ÜBER DIE PHASENÄNDERUNG DES LICHTES BEI DER REFLEXION

UND

METHODEN ZUR DICKENBESTIMMUNG DÜNNER BLÄTTCHEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

MATHEMATISCHEN UND NATURWISSENSCHAFTLICHEN FACULTÄT

DER

KAISER-WILHELMS-UNIVERSITÄT STRASSBURG

ZUR

ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

VORGELEGT

VON

OTTO WIENER

AUS KARLSRUHE.

HIERZU EINE TAFEL.

LEIPZIG,

DRUCK VON METZGER & WITTIG.

1887.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547619_0048

Die optischen Eigenschaften durchsichtiger Metallblättchen haben für die Theorie des Lichtes ein grosses Interesse und bieten dem Experimente noch ein weites Feld zur Ermittlung neuer Thatsachen. Von Herrn Professor Kundt angeregt, die Absorption des Lichtes in dünnen Metallschichten zu untersuchen, vermisste ich in den bisher darüber vorhandenen Arbeiten eine allgemeine, d. h. auf alle Metalle anwendbare und genaue Methode, die Dicke dieser Schichten zu bestimmen. Da aber eine solche die wesentliche Voraussetzung zur Feststellung des absoluten Betrages der Absorption bildet, so war es meine nächste Aufgabe, eine derartige Methode aufzusuchen. Die Ergebnisse meiner diesbezüglichen Bemühungen bilden den ersten Theil der vorliegenden Arbeit (Abschnitt I und II).

Der zweite Theil (Abschnitt III—V) handelt über die Phasenänderung des reflectirten Lichtes und entstand Schritt für Schritt aus dem ersten. Eine grosse Schwierigkeit nämlich, welche sich bei den Dickenbestimmungen entgegenstellt, besteht in der Veränderlichkeit der Phasenänderung, welche das Licht bei Reflexion an dünnen Metallschichten erleidet. Geringe, schwer zu verhütende Verunreinigungen des Metalles sind hiervon nicht die alleinige Ursache; die Phasenänderung hängt auch von der Dicke der Schicht ab. Dieser Umstand führte zunächst zu der Frage: Welches ist der Gang der Phasenänderung, wenn die Dicke des Metalles von Null bis zur Undurchsichtigkeit zunimmt? Diese Frage hat ein selbständiges

theoretisches Interesse. Denn mit ihr zugleich wird die folgende entschieden: Entspricht die Aenderung der Phase einer Beschleunigung oder Verzögerung? Diese Frage war bis jetzt nicht sicher beantwortet.

Es gelang mir, zunächst für Silber eine sichere Antwort zu finden (Abschnitt III), und es hat dies darin seinen Grund, dass mir in den durch das Zerstäuben einer Kathode hergestellten Spiegeln[1]) ein dazu geeigneteres Material zu Gebote stand, als dies bei früheren darauf abzielenden Beobachtungen der Fall war.

Jetzt lag es nahe, auch für durchsichtige Körper diese Frage zu behandeln. Die deshalb angestellten Versuche führten zu merkwürdigen Interferenzerscheinungen, welche auftreten, wenn man Licht an zwei aneinander grenzenden dünnen Blättchen reflectiren lässt und spectral zerlegt (Abschnitt IV). Es stellt sich heraus, dass man diese Interferenzerscheinungen zu einer ausserordentlich feinen Methode der Dickenbestimmung verwerthen kann, welche bei Silber eine Lamellendicke von der Grösse eines Milliontelmillimeters noch der Messung zugänglich macht.

Damit ist aber die Möglichkeit gegeben, für Silber nicht allein den Verlauf, sondern auch die genaue Abhängigkeit der Phasenänderung von der Dicke der Schicht festzustellen. Dies führt somit wieder auf die Untersuchung der Phasenänderung bei durchsichtigen Metallschichten zurück (Abschnitt V).

Erster Theil.

I. Methoden zur Dickenbestimmung dünner Blättchen im allgemeinen.

§ 1. Die bisherigen Methoden.

Das einfachste Verfahren, die Dicke eines Metallblättchens zu ermitteln, ist die Wägung. Dasselbe setzt voraus, dass die Lamelle überall die gleiche Dicke besitzt. Dieser Anforderung genügen aber im allgemeinen die Metallblättchen, die man

1) Vgl. Dessau, Wied. Ann. **29.** p. 353. 1886.

herzustellen vermag, sehr wenig. Man ist daher auf optische Methoden angewiesen. Die einzige, auf alle Metalle anwendbare Methode, die meines Wissens bis jetzt vorliegt, rührt von Quincke her.[1])

Von einer auf Glas aufgetragenen Metallschicht wische man an der Stelle, deren Dicke zu bestimmen ist, einen Streifen weg und presse eine Glaslinse auf, so dass sie das Metall genau an der Grenze des Streifens berührt. Die Dicke ergibt sich dann aus der Farbe der Luftschicht, die am Berührungspunkt der Linse an das Metall angrenzt und somit die gleiche Dicke wie dieses besitzt.

Quincke bemerkt jedoch, dass leicht Staubtheilchen zwischen Linse und Platte unbemerkt bleiben, und man dann eine zu grosse Dicke der Metallschicht findet. Er benutzte daher zu seinen optischen Untersuchungen meist Silberschichten, deren Dicke er nach einer Methode von Fizeau[2]) bestimmte. Durch Auflegen eines Jodkornes verwandelt man das Silber in Jodsilber und vergleicht die Farbe desselben mit den Farben der Newton'schen Ringe, für welche Quincke eine ausführliche Tabelle aufgestellt hat.[3]) Dann berechnet sich aus der Dicke d der Jodsilberschicht die Dicke der ursprünglichen Silberschicht nach der Formel:

$$D = \frac{Ag \,.\, s_{AgJ}}{AgJ \,.\, s_{Ag}} d,$$

worin s_{Ag}, s_{AgJ} bezüglich die specifischen Gewichte für Silber und Jodsilber bedeuten; Ag das Atomgewicht von Silber und AgJ die Summe der Atomgewichte von Silber und Jod.

Später hat Wernicke[4]) für Silber eine Methode angegeben, welche die eben erwähnte an Genauigkeit übertrifft. Dieselbe besteht darin, dass er von dem in Jodsilber verwandelten Blättchen senkrecht reflectirtes Licht spectral zerlegt. Aus der Lage der im Spectrum auftretenden Interferenzstreifen kann man dann die Dicke des Jodsilbers finden nach der Formel:

---

1) Quincke, Pogg. Ann. **129.** p. 178. 1866.
2) Fizeau, Compt. rend. **52.** (1) p. 274. 1861.
3) Quincke, l. c. p. 180.
4) Wernicke, Pogg. Ann. Ergbd. **8.** p. 68. 1878.

$$d = n\frac{\lambda}{2},$$

wo λ die Wellenlänge in Jodsilber für die ausgelöschte Farbe bedeutet, n eine ganze Zahl, welche die Ordnung des Interferenzstreifens angibt, und aus der Lage eines zweiten im Spectrum vorhandenen Streifens oder durch Vergleichung mit einem Streifen von bekannter Ordnung gefunden wird. Der von Wernicke benutzte Apparat besteht einfach aus einem Spectrometer, welches in seiner Spaltröhre einen zur Axe derselben unter 45° geneigten Glasspiegel enthält, der durch eine seitlich angebrachte Oeffnung Licht empfängt und durch den Spalt auf das zu untersuchende Blättchen wirft. Von hier senkrecht reflectirt, geht das Licht durch den Spalt zurück, wird vom Prisma zerlegt und gelangt dann in das Fernrohr des Beobachters.

Die beiden zuletzt besprochenen Methoden können nur auf solche Metalle angewandt werden, welche wie Silber sich in eine Verbindung überführen lassen, die hinreichend durchsichtig ist, um die gewünschten Interferenzerscheinungen zu zeigen. Bis jetzt ist das bei den meisten Metallen noch nicht gelungen.

§ 2. Neue Methode der Dickenbestimmung.

Das von Quincke zur einer allgemeinen Methode der Dickenbestimmung benutzte Princip, die Interferenzen nicht durch die Lamelle selbst, sondern durch eine dünne Luftschicht zu erzeugen, lässt sich in einer Weise verwerthen, dass man den Mangel seiner Methode vermeidet. Dies geschieht, wenn man die gesuchte Dicke nicht als diejenige einer Luftschicht direct, sondern als den Dickenunterschied zweier aneinandergrenzender Luftschichten bestimmt. Von einer auf Glas hergestellten Lamelle wische man einen Streifen weg, lege eine zweite ebene Glasplatte auf (s. Querschnitt der Platten Fig. 1_a) und betrachte das Ganze im reflectirten Lichte einer Natriumflamme. Man nimmt dann ein System von Interferenzstreifen wahr (Fig. 1_b), welche im allgemeinen stetig verlaufen. Nur an der Grenze der entblössten Stelle sind die Interferenzstreifen gegen einander verschoben. Diese Verschiebung rührt von

der Verschiedenheit der Gangunterschiede her, welche die an der hinteren Fläche der Luftschicht zu beiden Seiten der Grenze reflectirten Strahlenbündel gegen das an der vorderen Fläche reflectirte besitzen. Die Differenz der Gangunterschiede darf nur dann allein auf Kosten des Dickenunterschiedes der Luftschichten gesetzt werden, wenn die Phasenänderung der Reflexion an der Lamelle die gleiche ist wie die an Glas; der Einfachheit halber sei zunächst angenommen, man habe es nur mit Lamellen zu thun, die dieser Anforderung entsprechen.

Würde man nun die Lage der Interferenzstreifen ausser im Natriumlicht noch in dem einer anderen homogenen Flamme bestimmen, so könnte man hieraus schon die Dicke der Lamelle finden. Besser bedient man sich aber des weissen Lichtes nach der von Wernicke angegebenen Methode. Nachdem die beiden Platten aneinander befestigt sind, bringt man sie vor den Spalt des Spectrometers so, dass die Grenze der von der Lamelle entblössten Stelle senkrecht zum Spalt verläuft. Das Spectrum zeigt dann zwei Systeme von Interferenzstreifen, welche an der der Grenze des Streifens entsprechenden Linie gegen einander verschoben sind (vgl. Fig. 3). Die beiden Theile des Spectrums, die so entstehen und übereinander liegen, werde ich in Zukunft der Einfachheit halber Interferenzfelder oder kurzweg Felder nennen. Die Verschiebung ist für verschiedene Stellen des Spectrums verschieden, weil der Dickenunterschied der Luftschichten für jede Farbe einen anderen Gangunterschied bedingt. Die Messung der Verschiebungen an nur zwei Stellen würde schon genügen, die Dicke der Lamelle zu bestimmen. Die Einzelheiten der Methode werden in § 4 gegeben.

§ 3. Beseitigung etwaiger Bedenken gegen die neue Methode.

a) Unebenheit der Platten. Zunächst mag man einwenden, dass Unebenheiten der aufgelegten Platte Fehler bedingen könnten. Dies wäre in der That dann der Fall, wenn die Platte gerade an der in Betracht kommenden Stelle eine plötzliche Vertiefung aufwiese. Es dürfen daher nur solche Gläser verwendet werden, welche auf ein Planglas aufgelegt

einen stetigen Verlauf der Interferenzcurven zeigen. Absolute Ebenheit ist nicht erforderlich, da die zwei bei der Dickenbestimmung in Betracht kommenden Stellen unmittelbar nebeneinander liegen.

Auf eines ist indes zu achten. Es ist wünschenswerth, dass die Interferenzstreifen im Spectrum nahezu senkrecht zur Grenze der Felder verlaufen, d. h. dass sich in einer zum Spalt parallelen Richtung die Dicke der Luftschicht nicht ändert. Das kann man leicht erreichen, wenn man die aufeinander gelegten Platten an ihrem Rande mit etwas Wachs- und Kolophoniumkitt aneinander befestigt und nun so lange an passenden Stellen presst, bis die Interferenzstreifen im reflectirten Natriumlicht senkrecht zur Grenze verlaufen. Beim Nachlassen des Druckes ändert sich dann die gegenseitige Lage der Gläser nicht mehr.

b) Auf den Oberflächen condensirte Gase. Einen Einfluss könnten zweitens die auf der Oberfläche der Spiegel condensirten Gasschichten haben. Es wurde schon mehrfach untersucht, ob die optischen Constanten spiegelnder Flächen durch atmosphärische Einwirkungen verändert werden. Indes kann man aus den bisherigen Beobachtungen auf den vorliegenden Fall nicht ohne weiteres einen Schluss ziehen.

Um daher unmittelbar zu erkennen, ob bei der Dickenbestimmung condensirte Gasschichten eine Rolle spielen, habe ich zunächst nach Waidele's[1]) Angabe verschiedene Glas- und Metallspiegel so behandelt, dass man beim Behauchen derselben das Bild eines Stempels erblickte, der vorher eine Zeit lang auf ihnen geruht hatte. Trotzdem konnte man beim Auflegen einer Glasplatte auf einen derart präparirten Spiegel im reflectirten Natriumlicht keinerlei Knickungen der Interferenzstreifen wahrnehmen.

Nun könnte man einwenden, dass derartige Versuche für die vorliegenden Verhältnisse nicht entscheidend sind. Der Unterschied in den anhaftenden Gasschichten, der durch das Waidele'sche Verfahren hervorgebracht wird, könnte bedeutend übertroffen werden von dem Unterschied, der entstehen mag, wenn man von einer Wochen lang gelegenen La-

1) Waidele, Pogg. Ann. **59.** p. 261. 1843.

melle behufs der Dickenbestimmung einen Streifen wegwischt und so neben der alten Lamellenoberfläche eine frische Glasoberfläche herstellt. Aus diesem Grunde versuchte ich nebeneinander mir eine alte und frische Glasoberfläche zu verschaffen. Eine Glasplatte wurde bis zur beginnenden Rothgluth erhitzt und gleich nach der Abkühlung auf chemischem Wege mit Silber belegt. An einer Stelle wurde dasselbe sofort, an einer benachbarten erst nach einigen Wochen entfernt. Zur Untersuchung legte ich sodann eine zweite Glasplatte auf und brachte das Ganze vor den Spalt des Spectrometers. Es gelang mir nicht, eine Verschiebung der Interferenzstreifen zu entdecken.

Ein anderer Versuch, der allenfalls mit einer verschiedenen Condensation von Gasen auf Platin und Glas erklärt werden könnte, wird an anderer Stelle (§ 5, c) mitgetheilt. Um indes alle noch etwa vorhandenen Bedenken gegen die angegebene Methode zu zerstreuen, habe ich sie für einen Silberspiegel mit der Methode von Wernicke verglichen (§ 4, b).

§ 4. Anwendung der Methode auf nicht metallische Schichten.

a) Allgemeines. Man bezeichne mit D die Dicke der Luftschicht zwischen dem aufgelegten Glas und der Lamelle, mit d die Dicke dieser selbst; ferner λ_n, $\lambda_{n+1} \ldots$, λ'_m, $\lambda'_{m+1} \ldots$ die Wellenlängen der durch Interferenz ausgelöschten Farben für die dickere, bezüglich dünnere der aneinander grenzenden Luftschichten. Dabei sollen die Indices der λ die Ordnung der zugehörigen Streifen angeben. Dann ist:

$$2(D + d) = n\lambda_n = (n + 1)\lambda_{n+1} = \cdots$$
$$2D = m\lambda'_m = (m + 1)\lambda'_{m+1} = \cdots,$$

wobei vorausgesetzt ist, dass die Phasenänderung in Luft an der Lamelle gleich derjenigen in Luft an Glas ist.

Für die vier Unbekannten D, d, n, m hat man, da im Spectrum stets eine Anzahl dunkler Streifen sichtbar ist, mehr als vier Bestimmungsgleichungen, woraus sie gefunden werden können. Die λ werden durch Einstellung des Fadenkreuzes im Fernrohr auf die Mitte der Interferenzstreifen ermittelt. Vor den Messungen nämlich war das Spectrometer in der von Wernicke[1]) angegebenen Weise ein für allemal mit Fraun-

1) Wernicke, Pogg. Ann. Ergbd. 8. p. 73. 1878.

hofer'schen Linien graduirt worden. Eine darauf gegründete graphische Interpolation gestattete dann, zu jeder Ablesung die entsprechende Wellenlänge zu finden.

Wenn der Einfachheit halber zukünftig gesagt wird, ein Streifen λ_n sei gegen einen anderen λ'_n um a Streifenbreiten verschoben, so ist unter Streifenbreite der Abstand zweier benachbarten Streifen desselben Interferenzfeldes, ausgedrückt durch die Differenz der ihnen entsprechenden Wellenlängen, d. h. die Grösse $(\lambda_n - \lambda_{n+1})$; und unter a das Verhältniss des Abstandes von λ_n und λ'_n zur Streifenbreite, d. h. die Grösse $(\lambda_n - \lambda'_n) : (\lambda_n - \lambda_{n+1})$ verstanden. Aus folgenden drei Gleichungen, welche dreien Interferenzstreifen entsprechen:

$$2(D + d) = n\lambda_n = (n + 1)\lambda_{n+1},$$
$$2D = n\lambda'_n$$

ergibt sich dann:

$$d = \frac{\lambda_n - \lambda'_n}{\lambda_n - \lambda_{n+1}} \cdot \frac{\lambda_{n+1}}{2} = a\frac{\lambda_{n+1}}{2},$$

d. h. die Anzahl a der Streifenbreiten, um welche λ_n gegen λ'_n nach dem rothen Ende des Spectrums zu oder, wie ich fernerhin kurzweg sagen werde, nach dem rothen oder nach Roth zu verschoben ist, gibt an, ein Wievielfaches von $\lambda_{n+1}/2$ die gesuchte Dicke ist.

Es sei in obiger Formel a eine ganze Zahl, so folgt: Die Wellenlänge der Farben, für welche die Interferenzstreifen an der Grenze beider Felder sich decken, sind gleich der doppelten Dicke des Blättchens, dividirt durch eine ganze Zahl. Lässt man d constant und λ sich ändern, so ergibt sich: Die Verschiebung ist der zugehörigen Wellenlänge umgekehrt proportional. Die Wellenlängen der Linien C und G verhalten sich nun nahezu wie 3 : 2. Die Verschiebung der Interferenzstreifen ist also bei G ungefähr dreihalbemal so gross als bei C. Hieraus ersieht man, dass ein Blick auf die Vertheilung der Streifen im Spectrum sofort erkennen lässt, wie viel ganze Streifenbreiten die Verschiebung an einer bestimmten Stelle beträgt. Lässt man umgekehrt λ constant und d sich ändern, so folgt, dass die Verschiebung der Interferenzstreifen mit der Dicke des Blättchens proportional zunimmt. Und zwar verschieben sich dann die Streifen für die dünnere Luftschicht

bei wachsender Dicke des Blättchens gegen die Streifen der dickeren Luftschicht nach dem violetten zu. In der That sieht man bei einer keilförmigen Lamelle, von der man senkrecht zur Schneide des Keils einen Streifen weggewischt hat, wie die Interferenzen der dünneren Luftschicht gegen die anderen nach Violett zu sich verschieben und diese bisweilen überholen, wenn man die Platten vor dem Spalt in Richtung wachsender Lamellendicken vorbeiführt.

b) Vergleichung verschiedener Methoden. Zur genaueren Controle der Methode diente unter anderem der folgende Versuch. Es wurde auf einer Glasplatte mit der Silberlösung von Martin[1]) und der aldehydhaltigen Reductionsflüssigkeit von Wernicke[2]) ein Silberspiegel hergestellt. Derselbe wurde längs eines Streifens (Fig. 2) vom Silber entblösst, in einer dazu senkrechten Richtung auseinandergeschnitten und dann zur Hälfte in Jodsilber[3]) zur Hälfte in Schwefelsilber verwandelt. Die letztere Umwandlung geschah so, dass der Spiegel in eine mit Wasserstoff gefüllte Verbrennungsröhre gebracht wurde, in der sich einige Schwefelstücke befanden. Beim Erhitzen derselben entstanden Schwefeldämpfe, welche das Silber in Schwefelsilber überführten. An zwei früher benachbarten Stellen (a, b) wurden die Dicken beider Schichten nach dem neuen Verfahren und ausserdem die Jodsilberschicht nach dem von Wernicke bestimmt.

In den folgenden Tabellen bedeutet λ die einem Interferenzstreifen entsprechende Wellenlänge, n seine Ordnungszahl; d, d_1, d_2 bezüglich die Dicken der Lamelle selbst und der dickeren und dünneren Luftschicht. In der ersten Tabelle sind die ν die Brechungsexponenten,[4]) die l die zugehörigen Wellenlängen für Jodsilber. Wellenlängen und Lamellendicken sind im Folgenden stets in Milliontelmillimetern ($\mu\mu$) angegeben. Die Rechnung ist in der aus den Tabellen ersichtlichen Weise angestellt.

---

1) Martin, Compt. rend. **56.** p. 1044. 1863.
2) Wernicke, Pogg. Ann. **133.** p. 184. 1868.
3) Wernicke, Pogg. Ann. Ergbd. **8.** p. 69. 1878.
4) Wernicke, Pogg. Ann. Ergbd. **8.** p. 73. 1878.

Tabelle 1.

Dickenbestimmung der Jodsilberschicht nach Wernicke.

λ	ν	l	n	$2d = nl$	d
571,6	2,193	260,6	4	1042	521
482,7	2,298	210,1	5	1051	526
					Mittel: 523

Tabelle 2.

Dickenbestimmung der Jodsilberschicht nach der neuen Methode.

n	λ_1	$2d_1 = n\lambda_1$	λ_2	$2d_2 = n\lambda_2$	$2d = 2(d_1 - d_2)$
22	—	—	661,1	14544	—
23	—	—	633,2	14564	—
24	651,5	15636	608,5	14604	1032
25	625,5	15638	583,7	14593	1045
26	601,0	15626	558,0	14508	1118
27	579,0	15633	538,0	14526	1107
28	557,7	15616	520,8	14582	1034
29	538,0	15602	503,2	14593	1009
30	520,8	15624	—	—	—
31	503,2	15599	468,5	14524	1078
32	488,2	15622	—	—	—
33	472,7	15599	—	—	—
34	459,4	15620	—	—	—
		Mittel: 15620		Mittel: 14560	

Die Differenz der Mittel von $2d_1$ und $2d_2$ ist:

$2d = 1060$; also:

$d = 530$.

Tabelle 3.

Dickenbestimmung der Schwefelsilberschicht nach der neuen Methode.

n	λ_1	$2d_1 = n\lambda_1$	λ_2	$2d_2 = n\lambda_2$	$2d = 2(d_1 - d_2)$
13	—	—	636,2	8271	—
14	624,6	8744	592,3	8292	452
15	583,6	8754	551,7	8276	478
16	546,8	8749	517,8	8285	464
17	514,0	8738	484,8	8242	496
18	483,9	8710	458,6	8255	455
19	458,1	8704	434,5	8256	448
20	434,5	8690	—	—	—
		Mittel: 8727		Mittel: 8268	

Die Differenz der Mittel von $2d_1$ und $2d_2$ ist:

$2d = 459$; also:

$d = 230$.

Setzt man, um aus der Dicke der Jodsilberschicht rückwärts die der Silberschicht zu finden, in der oben (p. 5) angegebenen Formel für das Atomgewicht von Silber und Jod bezüglich 108 und 127, für die specifischen Gewichte von Silber und Jodsilber: 10,62 [1]) und 5,712 [2]), so ist die Dicke des Silbers $D = 0{,}247\, d$. Dann ergibt sich aus Tabelle 1:

$$D = 129,$$

aus Tabelle 2: $D = 131.$

Das Atomgewicht von Schwefel ist 32. Das specifische Gewicht schwankt für verschiedene Schwefelsilbersorten nach Wurtz [3]) zwischen 6,85 und 7,00. Setzt man $D = 129$, so gibt Tabelle 3 das specifische Gewicht des Schwefelsilbers = 6,84; nimmt man aber für dieses 7,00, da auch das Silber im gefällten Zustande ein höheres specifisches Gewicht als gewöhnlich besitzt, so findet man $D = 132$. Die drei verschiedenen Bestimmungen ergeben also für die Dicke des Silbers folgende Werthe:

129, *131*, *132* Milliontelmillimeter,

welche im Maximum von einander um weniger als 3 Proc. abweichen und für die Brauchbarkeit der neuen Methode sprechen.

Auffallend ist in Tabelle 2, dass die Einzelwerthe von $2d_2$ um 7 pro Mille, die von $2d_1$ nur um 3 von einander im Maximum abweichen. Auf den Streifen λ_2 mit der Ordnungszahl 30 konnte wegen seiner Verwaschenheit nicht sicher eingestellt werden. Aus Tabelle 1 ist zu ersehen, dass gerade an seine Stelle ein Streifen ($n = 5$) für Jodsilber fällt. Auch die anderen Unregelmässigkeiten rühren von den an der Rückseite der Jodsilberschicht reflectirten Strahlen her. Bringt man aus diesem Grunde für die λ_2 Correctionen an (vgl. die Berechnung solcher Correctionen in § 11), so ergibt sich, wie aus der folgenden Tabelle zu ersehen ist, eine grössere Uebereinstimmung der Einzelwerthe von $2d_2$, während der Mittelwerth kaum geändert wird.

1) Conroy, Proc. of the Roy. Soc. of London **37.** p. 37. 1884.
2) Wernicke, Pogg. Ann. Ergbd. 8. p. 74. 1878.
3) Wurtz, Dictionnaire de chimie.

Tabelle 4.

n	λ_2	$2d_2 = n\lambda_2$	$2d = 2(d_1 - d_2)$
22	661,7	14557	—
23	632,0	14536	—
24	607,0	14568	1068
25	583,3	14583	1055
26	559,0	14534	1092
27	539,1	14556	1077
28	519,6	14557	1059
29	502,4	14570	1032
30	—	—	—
31	469,3	14548	1051
		Mittel: 14557	

während nach Tab. 2: 14560;
die dadurch eintretende Veränderung im Werthe von d ist zu vernachlässigen.

Bei dem Versuch mit Schwefelsilber sind die Abweichungen der Einzelwerthe für die Dicken beider Luftschichten von ungefähr gleicher Grösse; d. h. in Schwefelsilber ist die Absorption so gross, dass die an der hinteren Fläche der Schicht reflectirten Strahlen keinen merklichen Einfluss mehr auf die Erscheinung haben. In Fig. 3 ist diese schematisch dargestellt. Im rothen Ende des Spectrums beträgt die Verschiebung der Interferenzstreifen der dickeren Luftschicht gegen die der dünneren nach Roth zu etwa zwei Drittel, im blauen eine ganze Streifenbreite.

II. Methoden zur Dickenbestimmung dünner Metallschichten im besondern.

§ 5. Die Phasenänderung des Lichtes bei senkrechter Reflexion an Metallen.

a. Allgemeines. Wollte man das eben beschriebene Verfahren ohne weiteres auf Metalle anwenden, so würde die Rechnung stets zu kleine, ja unter Umständen negative Werthe für die Dicke liefern; ähnlich wie man nach Quincke[1]) negative Brechungsexponenten erhält, wenn man die Phasenänderung beim Durchgange durch eine dünne Silberschicht allein auf Kosten des in ihr zurückgelegten Weges setzt. Der Grund liegt in dem

1) Quincke, Pogg. Ann. **129.** p. 187. 1866.

anomalen Verhalten der Phasenänderung des Lichtes bei Reflexion und beim Durchgange durch die Metalle. Die Phasenänderung der Reflexion hat Quincke[1]) bei Silber nach verschiedenen Methoden untersucht und fand dieselbe für Reflexion in Glas in der Nähe der senkrechten Incidenz (10—30°) gleich einer Beschleunigung von 0,3 bis 0,4 Wellenlängen.[2])

Später bestimmte Wernicke[3]) nach der folgenden höchst einfachen Methode die Phasenänderung für senkrechte Incidenz. Er belegte ein dünnes Glasplättchen zur Hälfte mit Silber und brachte es vor den Spalt seines Spectrometers (p. 6), die Silberseite vom Spalte abgewandt. Die Interferenzstreifen waren dann an der Stelle, wo die Reflexion an Silber begann, gegen die anderen um etwa eine viertel Streifenbreite nach Violett zu verschoben. Aehnliches Verhalten fanden Wernicke und Quincke auch bei anderen Metallen.

b. Die Phasenänderung bei Reflexion in Luft an Silber. Für die Reflexion in Luft, welche bei der Dickenbestimmung in Betracht kommt, hat Wernicke keine Beobachtungen angestellt. Quincke findet für diesen Fall mit verschiedenen Methoden verschiedene Resultate; zum Theil ein ähnliches Verhalten wie bei Reflexion in Glas. Ich habe daher in dieser Richtung einige Versuche angestellt. Die Spiegel, die dazu dienten, waren durch Zerstäuben eines Silberdrahtes im Vacuum hergestellt.

Da diese Spiegel bei der vorliegenden Arbeit in ausgedehntem Maasse zur Verwendung kamen, soll von vorn herein auf einige Eigenthümlichkeiten derselben aufmerksam gemacht werden. Die Gestalt derselben ist die eines Konus, wenn die Kathode gestreckt und senkrecht auf die zu bestäubende Platte gerichtet ist. Fig. 4 stellt ein Stück des Querschnittes eines Silberspiegels dar, dessen Form durch Dickenbestimmung an mehreren Stellen ermittelt wurde. Ferner sind die Spiegel, wie Hr. Prof. Kundt[4]) nachgewiesen hat, doppelbrechend.

---

1) Quincke, Pogg. Ann. **142.** p. 192. 1871.

2) Um nicht vorzugreifen, gebe ich die Aenderungen der Phase vorerst wie Quincke und Wernicke als Beschleunigungen an.

3) Wernicke, Pogg. Ann. **159.** p. 198. 1876.

4) Kundt, Wied. Ann. **27.** p. 59. 1886.

Diese Eigenschaft ist für die vorliegenden Versuche ohne Belang (s. § 8). Die Spiegel besitzen im allgemeinen einen ausserordentlichen Glanz. Nur wenn geringe Oxydation stattgefunden hat, welche oft schwer zu verhüten ist[1]), wird der Metallglanz vermindert.

Zur Bestimmung der Phasenänderung wurde eine Glasplatte zum Theil von einem Glimmerblättchen mit geradliniger Begrenzung bedeckt und dann der Bestäubung mit Silber ausgesetzt. Sodann wurde das Glimmerblättchen wieder abgehoben, eine zweite Glasplatte aufgelegt und die Platten vor das Spectrometer gebracht. Nachdem die Verschiebung der Interferenzstreifen für die beiden aneinander grenzenden Luftschichten gemessen war, wurde die Dicke des Silbers durch Verwandeln in Jodsilber bestimmt. Dann ist die Dicke d_1 der Luftschicht an der vom Silber entblössten Stelle (s. Fig. 5) durch die zugehörigen Interferenzen unmittelbar gegeben, die der anderen Luftschicht d_2 mittelbar aus der Dicke D des Silbers. Aus jener und den für Reflexion an Silber auftretenden Interferenzen lässt sich also die Phasenänderung bei Reflexion in Luft an Silber berechnen. Es ergab sich im allgemeinen ungefähr die gleiche Phasenänderung wie bei Reflexion in Glas. Dieselbe näherte sich aber umsomehr derjenigen für Reflexion an einem durchsichtigen optisch dichteren Medium, d. h. der Phasenänderung von einer halben Wellenlänge, je weniger der Spiegel metallglänzend aussah, und je länger er nach seiner Herstellung gelegen hatte. Von den angestellten Versuchen sei nur einer des näheren erwähnt.

Es wurde ein Silberspiegel mit metallischem Glanze und von wechselnder Dicke mit aufgelegter Glasplatte untersucht. Bei einer Stelle, wo die Dicke des Spiegels 35 Milliontelmillimeter ($\mu\mu$) betrug, war in der Nähe der D-Linie keine Verschiebung vorhanden; bei einer Dicke von 29 $\mu\mu$ für $\lambda = 559$ sogar eine kleine Verschiebung von 0,07 Streifenbreiten der Interferenzen für die dünnere Luftschicht gegen die der dickeren nach Roth zu. D. h. die am Metall reflectirten Strahlen sind gegen die an Glas reflectirten durch den Vorgang der Reflexion

1) Dessau, Wied. Ann. **29.** p. 355. 1886.

im ersten Falle um 0,12, im zweiten um 0,18 Wellenlängen verzögert, oder absolut genommen um 0,38 bezüglich 0,32 Wellenlängen beschleunigt.

Da es sehr schwer ist, reine metallische Oberflächen zu gewinnen, bemühte ich mich nicht weiter, constante Zahlen für die Phasenänderung in Luft zu erhalten. Es liegt die Vermuthung nahe, dass auch bei Quincke die erwähnten Umstände die Inconstanz seiner Resultate bedingten. Wenigstens gibt er in einem Falle, wo das Silber von seinem gewöhnlichen Verhalten abweicht, an, dass es eine schlechte Politur oder einen matten Glanz zeigte.[1])

c. Der Einfluss des längeren Liegens der Spiegel auf die Phasenänderung. Dieser Einfluss ist für Silber schwer zu untersuchen, weil es sich in dünnen Schichten beim Erhitzen auf höhere Temperaturen leicht verflüchtigt. Ich benutzte daher zu dem folgenden Versuche einen Platinspiegel. Ich hatte auch bei einem dünnen Platinspiegel ähnlich wie oben bei Silber eine Verschiebung der Interferenzstreifen für die Reflexion an Platin gegen die für Glas nach Roth zu gesehen. Ein anderer Platinspiegel von ziemlich gleichförmiger Dicke, welchen Hr. Dessau zu anderen Zwecken durch Wägung auf 30 $\mu\mu$ bestimmt hatte, und der bereits über ein viertel Jahr gelegen, zeigte im Gegentheil eine kleine Verschiebung nach Violett, welche einer Phasenänderung der Reflexion von etwa einer halben Wellenlänge entsprochen hätte. Dieser Spiegel wurde ausgeglüht. Nochmals untersucht, zeigte er jetzt eine kleine Verschiebung der Interferenzstreifen in entgegengesetzter Richtung wie zuvor, welche einer den Metallen eigenthümlichen Phasenänderung entsprochen hätte. Auch der Metallglanz des Spiegels hatte zugenommen.

Mit Sicherheit kann eine Erklärung dieses Verhaltens nicht angegeben werden. Berücksichtigt man den oben mitgetheilten Versuch mit der frischen und alten Glasoberfläche (§ 3, b), so möchte man geneigt sein, an eine während des Liegens eingetretene chemische Veränderung des Spiegels zu denken. Es steht aber nichts im Wege, die Ursache des Ver-

1) Quincke, Pogg. Ann. **142.** p. 216. 1871.

haltens in der vom Platin adsorbirten Gasschicht zu suchen, welche viel bedeutender als die auf der Glasoberfläche verdichtete sein könnte.

§ 6. Erweiterung der angegebenen Methode zur Dickenbestimmung von Metallschichten.

Aus dem Gesagten geht hervor, dass es nicht möglich ist, ein für allemal die Phasenänderung für ein Metall zu ermitteln und diese zur Dickenbestimmung nach der angegebenen Methode unmittelbar zu verwerthen. Es stehen dann noch im wesentlichen zwei Wege offen. Entweder man macht sich von der metallischen Phasenänderung unabhängig, oder man bestimmt sie in jedem einzelnen Falle. Das erstere geschieht, wenn man das Metall in eine Verbindung verwandelt, welche die normale Phasenänderung zeigt; es ist aber nach dem neuen Verfahren weder nöthig, dass diese Verbindung gut durchsichtig sei, noch dass man ihren Brechungsexponenten kenne. Die Brauchbarkeit eines solchen Verfahrens wurde oben (§ 4, b) für Schwefelsilber dargelegt.

Eine Methode, welche die metallische Phasenänderung auf eine andere Weise eliminirt, hat mir Hr. Prof. Kundt vorgeschlagen. Nachdem von dem Spiegel ein Streifen weggewischt ist, schlage man noch einmal eine dünne Metallschicht darauf nieder und untersuche ihn bei aufgelegter Glasplatte mit dem Spectrometer. Hat man den zweiten Niederschlag nicht auf den ganzen Spiegel ausgedehnt, so entstehen auf dem Spiegel vier Felder (s. Fig. 6), von denen eins (2) zweimal, zwei (1 und 3) einmal und eins (4) gar nicht mit einem Metallniederschlag versehen wurde. Führt man einen solchen Spiegel mit aufgelegter Glasplatte vor dem Spalt des Spectrometers vorbei, so bemerkt man eine plötzliche Aenderung der Verschiebung der Interferenzstreifen, sowie die Felder 2, 3 an Stelle von 1, 4 vor dem Spalt erscheinen. Und zwar verschieben sich die Streifen für die dickere Luftschicht plötzlich um ein der Phasenänderung entsprechendes Stück, gegen die anderen nach Roth, wenn die Platten im angegebenen Sinne verrückt werden.

Zur genauen Dickenbestimmung ist zweierlei erforderlich.

Erstens muss die Phasenänderung für die beiden verschieden dicken Metallschichten (2 u. 3) gleich gross sein. Inwiefern diese von der Dicke des Metalles abhängt, wird in § 13 für Silber angegeben. Zweitens muss der wiederholte Niederschlag auf den beiden Feldern 2 und 3 wenigstens an der Grenze gleich dick sein. Mit Silber ist mir dies beim Niederschlagen auf chemischem Wege nicht geglückt, wohl aber mit dem Zerstäuben einer Silberelectrode im Vacuum, wie das folgende Beispiel zeigen wird. Ein auf die angegebene Weise hergestellter Silberspiegel wurde behufs Dickenbestimmung in Jodsilber verwandelt. Die Grössen λ, n, d in der folgenden Tabelle bedeuten bezüglich die einem Interferenzstreifen zukommende Wellenlänge in Jodsilber, seine Ordnungszahl und die Dicke des Jodsilbers.

Tabelle 5.

Feld 1.			Feld 2.			Feld 3.		
n	λ	$d_1 = \frac{n\lambda}{2}$	n	λ	$d_2 = \frac{n\lambda}{2}$	n	λ	$d_3 = \frac{n\lambda}{2}$
2	260	260	3	274	411	1	314	157
3	175	263	4	205	410	2	151	151
Mittel:		$d_1 = 261$			$d_2 = 411$			$d_3 = 154$

Entspricht der Spiegel der oben gestellten Anforderung, so muss sein: $d_1 + d_3 = d_2$. Die Dickenbestimmung ergibt: $d_1 + d_3 = 415$; $d_2 = 411$. Die Abweichung der beiden Werthe liegt innerhalb der Grenze der Beobachtungsfehler.

Zur Controle der Methode selbst diente gleichfalls ein in angegebener Weise durch zweifaches Bestäuben hergestellter Silberspiegel. Der zweite Niederschlag wurde bis zur Undurchsichtigkeit getrieben, sodass die Gleichheit der Phasenänderung für die beiden Felder 2 und 3 ausser Frage gestellt war. Dies hatte allerdings den Nachtheil, dass an der zur Messung verwendeten Stelle das Silber nicht vollständig in Jodsilber verwandelt werden konnte. Denn die Ueberführung gelingt nur bis zu einer gewissen Dicke der Silberschicht. Zur Controle wurde daher der Silberspiegel auf dem Glimmerblättchen verwendet, welches beim erstmaligen Bestäuben dazu gedient hatte, die eine Hälfte der Glasplatte zuzudecken. Ich hatte

öfters zuvor die Beobachtung gemacht, dass beim Verwandeln eines solchen Spiegels in Jodsilber die Newton'schen Ringe auf Glas und Glimmer an der Grenze nicht gegeneinander verschoben waren; d. h. dass auf das Glas sich ebensoviel Silber abgesetzt hatte, als auf der benachbarten Stelle des Glimmers. Mittels eines einfachen Verfahrens konnte nun der Punkt des Glimmerblättchens ermittelt werden, welcher demjenigen des Spiegels auf der Platte entsprach, der zur Dickenbestimmung gedient hatte. Zur Prüfung der Genauigkeit dieses Verfahrens wurde dasselbe zweimal ausgeführt (s. Tab. 7 a u. b). Die Tabelle 6 enthält die nach der neuen Methode ausgeführten Messungen. Die Bezeichnungen sind den früheren analog. Die ungestrichenen λ entsprechen der dickeren, die gestrichenen der dünneren Luftschicht. Die Berechnung der gesuchten Dicke, d, der Silberschicht geschah nach der Formel:

$$2\,d = \frac{\lambda_n - \lambda'_n}{\lambda_n - \lambda_{n+1}}\,\lambda_{n+1} = a\,\lambda_{n+1},$$

welche sich ableitet aus den folgenden:

$$2\,D = (n - x)\,\lambda_n = (n + 1 - x)\,\lambda_{n+1}$$
$$2\,D' = (n - x)\,\lambda'_n.$$

Dabei ist x die Phasenänderung bei Reflexion an Silber in Bruchtheilen einer Wellenlänge. Dieselbe ist für verschiedene Farben nur wenig verschieden (vergl. Wernicke[1]) und Tab. 12 b). Für zwei aufeinander folgende Streifen ist sie als gleich angenommen.

Tabelle 6.

Dickenbestimmung nach der neuen Methode.

n	λ	λ'	$a = \frac{\lambda_n - \lambda_n'}{\lambda_n - \lambda_{n+1}}$	$d = a\,\frac{\lambda_{n+1}}{2}$
n	654,9	626,2	0,593	180
$n + 1$	606,5	575,9	0,725	204
$n + 2$	564,2	537,0	0,691	182
$n + 3$	524,8	499,9	0,750	184
$n + 4$	491,6	468,2	0,803	186
$n + 5$	462,4	—	—	—
			Mittel:	$d = 187$

1) Wernicke, Pogg. Ann. **159.** p. 221. 1876.

Tabelle 7.

Dickenbestimmung nach Wernicke.

a.			b.		
n	λ_{AgJ}	$d_{AgJ} = n\frac{\lambda_{AgJ}}{2}$	n	λ_{AgJ}	$d_{AgJ} = n\frac{\lambda_{AgJ}}{2}$
5	301	753	5	303	758
6	256	768	6	258	774
7	221	774	7	220	770
	Mittel:	$d_{AgJ} = 765$			767

Mittel aus beiden Bestimmungen: 766.

Hieraus ergibt sich die Dicke des Silbers:

$$d = 189.$$

Die Mittel der von den beiden Methoden für d gelieferten Werthe weichen somit um etwa 1 Proc. von einander ab, während die Einzelwerthe der neuen Methode grössere Differenzen aufweisen. Ich habe in dieser Richtung vorläufig keine weiteren Versuche angestellt, weil mir andere Fragen vorerst von grösserer Wichtigkeit schienen.

Zweiter Theil.

III. Entspricht die Phasenänderung bei senkrechter Reflexion des Lichtes einer Verzögerung oder einer Beschleunigung?

§ 7. Beantwortung der Frage für Silber.

Quincke[1]) suchte diese Frage zuerst zu entscheiden, und zwar für Silber. Er benutzte dazu doppelt keilförmige Silberschichten, die er mit einem Jamin'schen Interferenzapparat untersuchte. Die von ihm beobachtete Erscheinung konnte indess keine Rechenschaft darüber geben. Quincke berichtet:

„Die Verschiebung der Interferenzstreifen an der dicksten gegen die an der dünnsten Stelle der Silberlamelle betrug stets weniger als eine Streifenbreite. Die Interferenzstreifen der dünnsten und dicksten Stelle hingen, was ich nicht erwartet hatte, bei fast allen Versuchen für die verschiedensten Einfallswinkel durch zwei dunkle Bogen zusammen. Gewöhnlich erscheint der längere matter, als der andere kürzere, aber er

1) Quincke, Pogg. Ann. **142.** p. 199. 1871.

war meist vorhanden. Man kann daher durch den Versuch nicht entscheiden, ob die Verschiebung um y Fransenbreiten nach der einen, oder um $(1 - y)$ Fransenbreiten nach der anderen Seite erfolgt ist. Der Versuch lässt, wie die Rechnung, in dieser Beziehung eine Unbestimmtheit."

Die Arbeit von Wernicke, in der er seine neue Methode zur Bestimmung der absoluten Phasenänderung der Reflexion mittheilt, enthält über diesen Punkt die folgende Notiz[1]):

„Um die Richtungen der Verschiebungen zu bestimmen, habe ich nach einander Glasblättchen angewandt, welche mit dünnen Silberschichten von verschiedener Dicke belegt waren. Lässt man das Silber von der Dicke Null an bis zur Undurchsichtigkeit wachsen, so rücken sämmtliche von der Metallreflexion herrührende Streifen nach dem violetten Ende des Spectrums hin. Würde statt des Silbers ein transparentes Medium von grösserem Brechungsvermögen als dem des Glases die Lamelle begrenzen, so würde die Verschiebung dieselbe Richtung haben, schliesslich aber, bei hinreichender Dicke der Schicht, nicht eine viertel, sondern etwa eine halbe Streifenbreite betragen."

Trotzdem zieht Wernicke den Schluss: „Die Absorption des Lichtes im Silber bewirkt eine Phasenverzögerung von nahezu 90^0 für alle Farben des sichtbaren Spectrums, wenn das Licht von Silber im Glase unter dem Einfallswinkel 0^0 reflectirt wird."

Bei einem vorläufigen Versuche war ich erstaunt darüber, die Richtungen der Verschiebungen der Interferenzstreifen im entgegengesetzten Sinne wie Wernicke zu finden. Ich bemühte mich daher, den Versuch in unzweideutiger Weise anzustellen. Die Methode zur Bestimmung der Phasenänderung war die gleiche wie bei Wernicke. Nur in der Herstellung der dünnen Blättchen wurden günstigere Bedingungen gesucht. Diese ermöglichten, dass ich an einer konusförmigen Silberschicht auf demselben Blättchen nebeneinander Schichten verschiedener Dicke untersuchen konnte und nicht wie Wernicke gezwungen war, dies nacheinander auf verschie-

1) Wernicke, Pogg. Ann. **159.** p. 220. 1876.

denen Blättchen zu thun. Bei der Herstellung solcher Präparate kommt es vor allem auf zwei Punkte an.

Erstens muss man sicher sein, dass die zu untersuchenden Silberblättchen wirklich keil- oder konusförmig und nicht von periodisch veränderlicher Dicke sind. Das letztere kann leicht bei chemisch auf einer Glasplatte niedergeschlagenem Silber eintreten, die in einer Versilberungsflüssigkeit auf einer Cylinder- oder Kugellinse geruht hatte. Deshalb benutzte ich durch Zerstäuben einer Silberelectrode hergestellte Spiegel von der Form eines Konus (Fig. 4), dessen Basis einen Radius von 30—40 mm hatte. Diese Spiegel wurden auf ihren regelmässigen Abfall nicht nur durch den Grad der Durchsichtigkeit, sondern auch durch Dickenbestimmung geprüft.

In zweiter Linie muss das Blättchen, auf dem das Silber niedergeschlagen ist, an der Grenze der Silberbelegung, zu deren beiden Seiten also beim Versuche die Reflexion theils an Silber, theils an Luft stattfindet, genau planparallel sein. Die Planparallelität soll auf einer Strecke von 30—40 mm bestehen; und dabei darf das Blättchen, damit man keine zu kleinen Abstände der Interferenzstreifen im Spectrum erhält, höchstens eine Dicke von 0,01 mm besitzen. Wernicke, dem es nur auf eine Planparallelität von etwa $^1/_{10}$ qmm ankam, konnte bequem mit Glasblättchen arbeiten. Ebene Glasblättchen aber von einer Länge von 30 mm, die den soeben aufgestellten Forderungen genügen, dürften wohl kaum herzustellen sein. Mir ist es jedenfalls nicht gelungen. Auch Collodiumhäutchen versagen hier ihren Dienst. Ich benutzte daher Glimmerplatten, von denen mir vorzügliche Exemplare zur Verfügung standen. Von diesen benutzte ich Spaltungsstücke von 0,003 bis 0,01 mm Dicke, welche sich bei spectraler Untersuchung auf eine Fläche bis zu 30—40 mm im Quadrat als überall gleich dick erwiesen; denn die im reflectirten Licht an ihnen erhaltenen Interferenzstreifen liefen überall dem Spalte parallel und waren frei von jedem Knick.

Solche Blättchen wurden für die Bestäubung mit Silber verwendet, nachdem sie vorher zur Hälfte mit einem anderen Glimmerblättchen von geradliniger Begrenzung bedeckt worden waren, um eine scharfe Grenze Glimmer-Silber zu erzielen.

Nach der Bestäubung wurden die Präparate, die Silberseite nach unten, sorgfältig auf ein Stück schwarzes Papier aufgelegt, das auf einer Glasplatte glatt aufgezogen war, und dann mit ein wenig Canadabalsam an den Ecken auf die Unterlage befestigt. An der Spiegelung war leicht zu erkennen, ob das Blättchen glatt auflag. Das Ganze wurde dann parallel zur Spaltebene, die Grenzlinie des Silberbeschlages senkrecht zur Richtung des Spaltes vor das Spectrometer gebracht. Das Stativ, von dem die Platte gehalten wurde, gestattete eine Drehung derselben um eine horizontale und verticale Axe und eine auf Zehntelmillimeter genau messbare Verschiebung derselben in horizontaler Richtung parallel der Spaltebene. Zunächst wurde das Blättchen so orientirt, dass es die auffallenden Strahlen senkrecht zurückwarf. Befand sich vor dem Spalt gerade eine dickere Silberschicht, so sah man jetzt scharf und deutlich die von Wernicke beschriebene Erscheinung (p. 15).

Der Einfachheit halber werde ich im Folgenden die Interferenzen, welche der Reflexion an Luft bezüglich an Silber entsprechen, mit Luft- und Silberinterferenzen bezeichnen. Wurde nun das Blättchen so verschoben, dass anfangs verschwindende und allmählich erst dicker werdende Silberschichten vor die eine Hälfte des Spaltes zu stehen kamen, so war anfangs keine Verschiebung der Interferenzstreifen in beiden Feldern zu bemerken. Allmählich verschoben sich aber die Silberinterferenzen gegen die Luftinterferenzen, und zwar nach dem rothen Ende des Spectrums und nicht nach dem violetten. Die Streifen verschoben sich continuirlich, und indem sie stets deutlich blieben, bis sie eine Verschiebung von etwa dreiviertel Streifenbreiten erreicht hatten. Ging man zu noch dickeren Silberschichten über, so konnte man eine Veränderung der Interferenzen nicht mehr wahrnehmen. Dieser Versuch wurde an einer grossen Zahl von Silberspiegeln auf Glimmer wiederholt, stets mit dem gleichen Resultate. Im Folgenden (§ 13) werden noch Messungen mitgetheilt werden, mit Hülfe deren des genaueren die Abhängigkeit der Phasenänderung von der Dicke des Silbers festgestellt wurde.

Es war nun manchmal vorgekommen, dass das während der Bestäubung aufliegende Glimmerblättchen einen kleinen Zwischenraum zwischen sich und dem unteren Blättchen gelassen hatte. Es bildete sich dann auf diesem eine keilförmige Silberschicht als Uebergang der beiden Felder. Bei der Untersuchung solcher Stellen sah man im Spectrum einen Zusammenhang der Interferenzstreifen. Die Luftinterferenzen hingen dann stets nach dem Rothen zu mit den Silberinterferenzen zusammen. An dickeren Stellen ging der Verbindungsbogen über etwa dreiviertel Streifenbreiten hinweg (s. Fig. 7).

§ 8. Beseitigung etwaiger Bedenken und weitere Versuche.

a) Die Doppelbrechung der Silberspiegel. Bei diesen Versuchen könnten zwei Punkte Bedenken erregen. Zuerst fragt es sich, welchen Einfluss die schon oben erwähnte Doppelbrechung hat, die den durch Zerstäuben der Kathode hergestellten Spiegeln eigenthümlich ist. Hr. Dessau[1]) hat den Gangunterschied der beiden radial und tangential polarisirten Komponenten untersucht und hat nachgewiesen, dass es sich hier nur um sehr kleine Unterschiede handelt, die mit dem Babinet'schen Compensator nicht nachgewiesen werden konnten. Um unmittelbar zu sehen, ob dieselben bei den vorliegenden Versuchen eine Rolle spielen, bestimmte ich die absolute Phasenänderung für beide Richtungen, indem ich eine Stelle eines Silberspiegels auf Glimmer aufsuchte, wo die Richtung eines Radius desselben mit einer Schwingungsrichtung im Glimmer zusammenfiel, in dieser Richtung einen Silberstreifen wegwischte und nach einander polarisirtes Licht anwandte, dessen Polarisationsebene mit einer der beiden Schwingungsrichtungen im Glimmer parallel war. Soweit die Genauigkeit der Methode reicht, konnte kein Unterschied der Phasenänderungen in beiden Fällen nachgewiesen werden. Die Genauigkeit der Einstellungen hängt von der Beleuchtung und Schärfe der Interferenzstreifen ab. Im günstigsten Falle waren die am meisten von einander abweichenden Einstellungen auf einen Streifen um etwa 0,03,

1) Dessau, l. c. p. 372.

im ungünstigsten etwa um 0,09 Streifenbreiten von einander verschieden. Im vorliegenden Falle erhielt ich bei zwei Bestimmungen als Mittel aus jeweils einigen Einstellungen folgende Werthe der Phasenänderungen für die radiale (a_r) und tangentiale (a_t) Komponente:

1) $a_r = 0{,}69$; $a_t = 0{,}66$
2) $a_r = 0{,}65$; $a_t = 0{,}69$.

Wie man sieht, weichen die Werthe in beiden Fällen in verschiedenem Sinne von einander ab.

b) Die Doppelbrechung im Glimmer. Zweitens fragt es sich, ob die Doppelbrechung im Glimmer die an der hinteren Fläche stattfindende Phasenänderung merklich modificiren kann. Dies zu entscheiden, wurde die Phasenänderung bestimmt bei auffallendem Licht, das unter wechselnden Azimuten polarisirt war, indem vor der seitlichen Oeffnung des Spaltrohres ein Nikol gedreht wurde. Während die absolute Lage der Interferenzstreifen sich ein wenig verschob (in den beobachteten Fällen etwa 0,1 Streifenbreiten), konnte in der gegenseitigen Lage und mithin in der Phasenänderung kein Unterschied festgestellt werden.

Zur näheren Klarlegung dieser Frage soll auch noch der theoretische Beweis geliefert werden, dass die Doppelbrechung des Glimmers hier nicht von Belang ist. Zur Vereinfachung der Rechnung wird die Dispersion im Glimmer vernachlässigt. Dies geschieht schon in der Formel für die die Phasenänderung bestimmende Verschiebung: $a = (\lambda'_{n+1} - \lambda_{n+1})/(\lambda_n - \lambda_{n+1})$, worin für die λ die Wellenlängen im Glimmer zu setzen wären, während bei der Ausrechnung stets diejenigen in Luft (λ_o) benutzt wurden, d. h. es wurde gesetzt: $\lambda_o : \lambda =$ einem constanten Brechungsexponenten. Dies ist für nicht zu grosse Abstände der Interferenzstreifen gestattet. Der dadurch entstandene Fehler lässt sich beurtheilen nach demjenigen, den man begeht, wenn man die relative Dispersion im Glasprisma des Spectrometers gegen die eines Normalspectrums vernachlässigt, indem man setzt: $\alpha : \lambda =$ constant, worin α die Ablenkung des der Wellenlänge λ entsprechenden Strahles bedeutet. Dieser Fehler wurde im Maximum etwas kleiner als 3 Proc. der Grösse a gefunden

und fällt mithin innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler.

Die Schwingungsrichtungen im Glimmer seien durch die Indices 1 und 2 bezeichnet. Ferner seien n_1 und n_2 die zugehörigen Brechungsexponenten; α der Winkel, welchen die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes mit (1) bildet; λ die Wellenlänge in Luft und endlich $A \sin(x) = A \sin(t/\tau - z/\lambda) 2\pi$ die Verrückung der Aethertheilchen für den einfallenden Lichtstrahl. Hierin bedeute z die Coordinate senkrecht zum Blättchen mit dem Nullpunkt in der oberen Fläche desselben.

Der ankommende Lichtstrahl zerlegt sich in zwei Theilwellen, entsprechend den beiden Schwingungsrichtungen. Jede Theilwelle liefert für das reflectirte Licht wieder je zwei Wellen, die von der unteren und oberen Fläche des Glimmerblättchens herrühren. Es sei für die Theilwelle i, wofür nacheinander die Indices 1 und 2 zu setzen sind, und für $z = 0$: $a_i' \sin(x + \varphi')$ die Aetherverrückung für den an der oberen Fläche, $a_i'' \sin(x + \varphi'')$ für den an der unteren Fläche und $a_i \sin(x + \varphi)$ für den im ganzen reflectirten Strahl; dann ist:

$$a_i \sin(x + \varphi) = a_i' \sin(x + \varphi') + a_i'' \sin(x + \varphi'').$$

Hieraus folgt: $a_i^2 = a_i'^2 + a_i''^2 + 2 a_i' a_i'' \cos(\varphi' - \varphi'')$.

Darin ist:

$$\varphi' = \pi, \qquad \varphi'' = -\left(\frac{2 d n_i}{\lambda} + \Delta\right) 2\pi,$$

wenn d die Dicke des Glimmerblättchens und Δ die an der hinteren Fläche desselben stattfindende Phasenänderung bedeutet. Da das Azimuth der ersten und zweiten Theilwelle für den einfallenden Strahl bezüglich $\cos\alpha$ und $\sin\alpha$ ist, so kann man setzen:

$$2 a_1' a_1'' = \alpha_1 \cos^2\alpha, \qquad 2 a_2' a_2'' = \alpha_2 \sin^2\alpha,$$

worin α_1 und α_2 die Reflexionsconstanten für die beiden Schwingungsrichtungen enthalten und einander nahezu gleich sind. Die Intensität des gesammten reflectirten Lichtes ist $a^2 = a_1^2 + a_2^2$. Die den Interferenzstreifen zugehörigen Wellenlängen werden dann aus der folgenden Gleichung gefunden:

$$\frac{d(a^2)}{d\lambda} = 0.$$

Vernachlässigt man, wie oben gesagt, die Dispersion, so ergibt sich hieraus die Bedingung:

$$(1) \quad \begin{cases} \alpha_1 n_1 \cos^2 \alpha \sin\left(\frac{2dn_1}{\lambda} + \Delta\right) 2\pi \\ + \alpha_2 n_2 \sin^2 \alpha \sin\left(\frac{2dn_2}{\lambda} + \Delta\right) 2\pi = 0. \end{cases}$$

Wenn man die beiden Sinus je nach zwei Winkeln entwickelt, indem man setzt:

$$2dn_1 + \Delta\lambda = [d(n_1 + n_2) + \Delta\lambda] + [d(n_1 - n_2)]$$

und: $2dn_2 + \Delta\lambda = [d(n_1 + n_2) + \Delta\lambda] + [d(n_1 - n_2)]$

lässt sich (1) auf die Form bringen:

$$(2) \quad A_1 \sin\left(d(n_1+n_2)+\Delta\lambda\right)\frac{2\pi}{\lambda} + A_2 \cos\left(d(n_1+n_2)+\Delta\lambda\right)\frac{2\pi}{\lambda} = 0.$$

Setzt man nun noch:

$$A_1 = A \cos\delta\, 2\pi, \qquad A_2 = A \sin\delta\, 2\pi,$$

so geht die Gl. (2) über in:

$$(3) \quad A \sin\left(\frac{d(n_1+n_2)}{\lambda} + \Delta + \delta\right) 2\pi = 0.$$

δ wird bestimmt durch die Gleichung:

$$(4) \quad \operatorname{tg}\delta \,.\, 2\pi = \left[\operatorname{tg}\frac{d(n_1-n_2)\,2\pi}{\lambda}\right] \frac{\alpha_1 n_1 \cos^2\alpha - \alpha_2 n_2 \sin^2\alpha}{\alpha_1 n_1 \cos^2\alpha + \alpha_2 n_2 \sin^2\alpha}.$$

Zur Vereinfachung der Formeln werde noch eingeführt der mittlere Brechungsexponent für Glimmer:

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2},$$

und die der Einheit nahezu gleiche Grösse:

$$k = \frac{\alpha_1 n_1}{\alpha_2 n_2}.$$

(3) geht dann über in:

$$(3_a) \quad A \sin\left(\frac{2dn}{\lambda} + \Delta + \delta\right) 2\pi = 0 \qquad \text{und (4) in:}$$

$$(4_a) \quad \operatorname{tg}\delta \,.\, 2\pi = \frac{k - \operatorname{tg}^2\alpha}{k + \operatorname{tg}^2\alpha} \operatorname{tg}\frac{d(n_1-n_2)\,2\pi}{\lambda}.$$

Aus (3_a) ergibt sich für die den Interferenzstreifen entsprechenden Wellenlängen die Bedingung:

$$\frac{2dn}{\lambda} + \Delta + \delta = m.$$

worin m eine ganze Zahl bedeutet. Zur Bestimmung von Δ dienen wieder, drei Interferenzstreifen entsprechend, die drei Gleichungen:

$$\frac{2dn}{\lambda_m} + \delta_m = m, \qquad \frac{2dn}{\lambda_{m+1}} + \delta_{m+1} = m + 1,$$

$$\frac{2dn}{\lambda'_{m+1}} + \Delta + \delta'_{m+1} = m + 1.$$

Die δ berechnen sich aus der Gl. (4_a). Ist in dieser der erste Factor auf der rechten Seite $= 0$ oder 1, so ist $\delta = 0$ oder mit λ umgekehrt proportional. In beiden Fällen erhält man $\Delta = (\lambda_m / \lambda'_{m+1}) \cdot \left((\lambda'_{m+1} - \lambda_m) / (\lambda_m - \lambda_{m+1})\right)$, d. h. den gleichen Werth, wie wenn der Glimmer nicht doppelbrechend wäre. Im allgemeinen haben aber die δ verschiedene Werthe, die nicht mit λ umgekehrt proportional sind. Es kommt indess nur auf die Unterschiede der δ an, da man einen der Werthe mit m zu einer neuen Grösse m' verschmelzen kann, was an der Formel für Δ nichts ändert. Bei meinen Versuchen war δ stets kleiner als 1. Für einen besonders ungünstigen Fall, nämlich dass der erste Factor auf der rechten Seite von (4_a) den Werth $^1/_2$ erhält, und dass $\delta \cdot 2\pi$ in der Nähe von $3\pi/4$ liegt, habe ich $(\delta_{m+1} - \delta_m)$ durch Rechnung $= 0{,}01$ gefunden; dies würde in der Bestimmung der Lage eines Interferenzstreifens einem Versehen um 0,01 Streifenbreiten entsprechen, das innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler fällt. Die Doppelbrechung im Glimmer ist demnach bei Anwendung von polarisirtem Lichte mit beliebigem Azimuth und somit auch bei Anwendung von natürlichem Licht ohne merklichen Einfluss auf die Bestimmung der Phasenänderung Δ.

c. Weitere Versuche. — Der auffällige Gegensatz zwischen den Beobachtungen von Wernicke und den meinen bewog mich, noch weitere Versuche unter abgeänderten Bedingungen anzustellen. Zunächst wurden die Glimmerblättchen durch Glasblättchen ersetzt. Es wurde auch auf solchen Silber durch Zerstäuben niedergeschlagen. An den Stellen, wo das zur Herstellung der Grenze Silber-Luft dienende Blättchen nicht glatt aufgelegen hatte, und sich daher eine keilförmige Silberschicht gebildet hatte (vgl. p. 25), sah man, wie bei den

Versuchen mit Glimmer die Luftinterferenzen über etwa dreiviertel Streifenbreiten hinweg nach Roth zu mit den Silberinterferenzen zusammenhängen (Fig. 7).

Um auch für chemisch niedergeschlagenes Silber den Gang der Phasenänderung zu prüfen, stellte ich einen Keil auf die folgende Weise her. Ein Glasblättchen wurde schräg in eine Versilberungsflüssigkeit eingetaucht (s. Fig. 8). Von den zwei sich bildenden Menisken benetzte der untere das Blättchen auf eine grössere Strecke hin als der obere. Der Silberkeil, der an der Stelle des Meniskus auf der unteren Seite entstand, wurde zur Untersuchung benutzt. Die auf solche Weise hergestellten Keile zeigen zwar in der Regel auch, wie die durch Anwendung von Cylinderlinsen gewonnenen periodische Schwankungen der Dicke. Indess konnte bei den untersuchten Spiegeln durch Ueberführung in Jodsilber nachgewiesen werden, dass der Keil an seiner dünnsten Stelle, auf die es hier allein ankommt, mit der Dicke 0 ansetzt und dann allmählich an Dicke zunimmt. Auch hier erhielt ich dieselbe Erscheinung wie früher (Fig. 7). Die Luftinterferenzen waren mit den Silberinterferenzen nach Roth zu durch einen Bogen verbunden, der über etwa dreiviertel Streifenbreiten hinwegging. Fragt man nach der Ursache der Abweichung des Resultates von Wernicke von dem meinen, so liegt die folgende Vermuthung nahe: Wernicke gibt an, dass wenn anstatt des Silbers ein transparentes Medium von grösserem Brechungsvermögen als dem des Glases die Lamelle begrenzte, die Verschiebung der Interferenzstreifen dieselbe Richtung haben würde wie bei Silber. Es wird später gezeigt werden (§ 10), dass auch bei Schichten transparenter Medien die Verschiebung der ihnen entsprechenden Interferenzstreifen bei zunehmender Dicke der Schicht nach dem rothen Ende des Spectrums zu erfolgt. Hat also Wernicke die untersuchten Silberblättchen in Jodsilber verwandelt und die Richtung der Verschiebungen im selben Sinne wie zuvor gefunden, so stehen seine Beobachtungen mit den meinen im Einklang. Wernicke hat sich dann nur in der Dicke seiner Blättchen geirrt.

Es dürfte somit kein Zweifel mehr darüber vorhanden sein, dass die Verschiebung der Silberinterferenzen nach Roth und

nicht nach Violett erfolgt. Was bedeutet nun dieses Verhalten? — Wenn man die Dicke der Silberschicht von Null bis zur Undurchsichtigkeit wachsen lässt, so ändert sich die Phase des am Silber reflectirten Lichtes ebenso, als ob das Glimmerblättchen an Stelle der Silberbelegung fortwährend an Dicke zugenommen hätte, d. h. als ob das Licht fortwährend einen grösseren Weg zurückgelegt haben würde. Nennt man nun eine Aenderung der Phase bei Reflexion eines Lichtstrahles an der Grenze zweier Medien eine Verzögerung oder Beschleunigung, je nachdem der Strahl sich so verhält, als hätte er einen grösseren oder kleineren Weg zurückgelegt, als den von einem Strahl durchmessenen, welcher an der geometrischen Grenze der beiden Medien reflectirt wird, so folgt: Die Reflexion an Silber bedingt gegenüber derjenigen an Luft und folglich auch absolut genommen[1]) eine Phasenverzögerung von etwa dreiviertel Wellenlängen und nicht eine Beschleunigung von einer viertel Wellenlänge. Würde der Brechungsexponent des Silbers grösser, als derjenige des Glases sein, so könnte man auch sagen: die Absorption bewirkt bei Silber eine Phasenverzögerung des reflectirten Lichtes von einer viertel Wellenlänge — nämlich gegenüber der Phasenänderung bei Reflexion im optisch dünneren am dichteren Medium. In diesem Sinne ist das zweite oben angeführte Citat von Wernicke zu verstehen: „Die Absorption bewirkt im Silber eine Phasenverzögerung von nahezu 90°.“ Damit steht aber das erste Citat im Widerspruch, wonach bei zunehmender Dicke des Silbers sich die Interferenzstreifen für Silber nach dem violetten Ende des Spectrums verschieben. Wäre das der Fall, so müsste man schliessen: die Phasenänderung ist eine Beschleunigung Die mitgetheilten Versuche zeigen nun, dass bei zunehmender Dicke des Silbers die Verschiebung der Interferenzstreifen für Silber nach dem rothen Ende des Spectrums erfolgt. Man darf also

1) Dass bei Reflexion im optisch dichteren am optisch dünneren Medium keine Phasenänderung eintritt, folgt aus dem Fresnel'schen (Pogg. Ann. Ergbd. 2. p. 345. 1845) und dem Lloyd'schen (Pogg. Ann. 45. p. 95. 1838) Spiegelversuche und aus dem Dunkelbleiben des Centrums der Newton'schen Ringe.

jetzt mit Recht schliessen: Die Phasenänderung bei Reflexion an Silber ist eine Verzögerung.

§ 9. Das Verhalten durchsichtiger Körper.

Da es zunächst von hohem Interesse war, die nunmehr für Silber entschiedene Frage für durchsichtige Körper zu untersuchen, bei denen die Phasenänderung eine halbe Wellenlänge beträgt, wurden einige der benutzten Silberblättchen in Jodsilber verwandelt. Auch hier sah man jetzt, wenn man von dünneren zu dickeren Schichten überging, die Jodsilberinterferenzen sich gegen die Luftinterferenzen nach Roth zu verschieben; aber die Verschiebung hielt nicht inne bei einer halben Streifenbreite, sondern ging weiter, sodass die Jodsilberstreifen die anderen sogar mehrfach überholten. Da der Verschiebung bei den anfangs untersuchten Blättchen keine Grenze gesetzt war, so stellte ich dickere conusförmige Jodsilberschichten her. Hier bot sich nun folgende Erscheinung dar. Zuerst überholten die Jodsilberinterferenzen die Luftinterferenzen mehrfach wie zuvor; dann fingen sie aber an zeitweise undeutlich zu werden und verschwanden; etwa ein viertel Streifenbreite gegen die Luftinterferenzen nach Roth zu verschoben, tauchten sie wieder auf, gingen etwa bis zu dreiviertel Streifenbreiten und verschwanden wieder; wenn sie wieder auftauchen, sind sie aber bereits weiter gegen Roth zu verschoben als vorher und verschwinden früher; schliesslich sind sie überhaupt nur noch nahezu in der Mitte zwischen zwei Luftinterferenzstreifen zu sehen und bleiben zuletzt in dieser selbst stehen, ohne wieder undeutlich zu werden. Im blauen Theile des Spectrums wurde die definitive Stellung, die also eine halbe Streifenbreite gegen diejenige der Luftinterferenzen verschoben ist, bei einer geringeren Dicke des Jodsilbers erreicht, als im rothen. Es wird gezeigt werden, dass dies von der grösseren Undurchsichtigkeit des Jodsilbers für blaue Strahlen herrührt.

Aehnlich verhalten sich Kupferoxydspiegel, welche durch Zerstäuben einer Kupferelectrode in Sauerstoff erhalten wurden.

Was hat diese Erscheinung zu bedeuten? Soll man annehmen, dass die Phasenänderung bei durchsichtigen Körpern einer Verzögerung von einer grösseren ungeraden Anzahl von

halben Wellenlängen entspricht? Diese Annahme erwies sich bald als unhaltbar. Bei dünneren Jodsilberschichten betrug nämlich die Verschiebung der Streifen gerade an den Stellen eine Anzahl von ganzen Streifenbreiten, wo gleichzeitig die Interferenzminima auftraten, die der Jodsilberschicht allein entsprachen, d. h. die Erscheinung war so, als ob das an der vorderen Glimmerfläche reflectirte Strahlenbündel nicht mit dem an der hinteren Glimmerfläche, sondern mit dem an der hinteren Fläche der Jodsilberbelegung reflectirten zur Interferenz gelangte. Um einen besseren Einblick in diese Vorgänge zu erhalten, habe ich zunächst einen anderen Weg eingeschlagen.

IV. Die Interferenz dreier Strahlenbündel, welche an zwei aneinander grenzenden durchsichtigen Lamellen senkrecht reflectirt sind.

§ 10. Beschreibung der Erscheinung und Theorie derselben.

Es wurde auf einem dünnen Glimmerblättchen eine conusförmige Jodsilberschicht hergestellt, welche in der Mitte ziemlich stark, nach aussen zu an Dicke rasch abnahm. Ein Theil des Interferenzbildes, das man sah, wenn man dieses Blättchen vor den Spalt des Spectrometers brachte, die Jodsilberseite vom Spalte abgewandt, ist in Fig. 9 schematisch dargestellt. Die schärferen und engeren Interferenzstreifen sind die durch das Jodsilberblättchen veränderten Interferenzen für Glimmer; die verwascheneren, breiteren rühren von der Jodsilberschicht allein her. Die schwach gezeichneten Linien bezeichnen die Lage der Interferenzstreifen, welche auftreten würden, wenn die Jodsilberschicht nicht vorhanden wäre. Dieses Bild zeigt die Erscheinungen nebeneinander, die vorher nacheinander gesehen wurden und im vorigen Paragraphen beschrieben sind. Im Rothen ziehen die Glimmer-Jodsilberinterferenzen in der Figur ununterbrochen von rechts unten nach links oben; das entspricht einer Verschiebung der Interferenzstreifen um mehrere Streifenbreiten gegen die Glimmer-Luftinterferenzen. Die Glimmer-Jodsilberinterferenzen sind an den Stellen geknickt, wo sie von den Jodsilberinterferenzen durchsetzt werden; an diesen

Stellen also geht die Phasenänderung am raschesten vor sich. Im Grünen sind an den nämlichen Stellen die Glimmer-Jodsilberinterferenzen unterbrochen, d. h. hier werden die Interferenzen bisweilen undeutlich, treten, gegen die Interferenzen Glimmer-Luft ein wenig nach Roth zu verschoben, wieder auf und gehen dann noch weiter nach Roth zu, um wieder zu verschwinden. Mehr nach Blau zu werden die Interferenzen immer steiler, bis sie im Violett ganz aufrecht stehen in der Mitte der Streifen Glimmer-Luft. Im wesentlichen die gleiche Erscheinung beobachtete ich bei anderen auf Glimmer niedergeschlagenen Jodsilber- und Kupferoxydspiegeln.

Diese verwickelte Erscheinung schien mir anfangs mit der Theorie im Widerspruch zu sein. Denn findet die Reflexion des Lichtes genau an der Grenze zweier Medien statt, so ist die Erscheinung anzusehen, als erzeugt durch eine Interferenz der drei Strahlenbündel, die von den drei Grenzen der beiden dünnen Blättchen reflectirt werden. Paart man diese Bündel zu je zweien, so sollte man drei Interferenzsysteme erwarten, die sich einfach durchkreuzen, während man in Wirklichkeit nur zwei sieht, die sich gegenseitig mit Knickungen durchsetzen. Hr. Prof. Kundt hat mich indess darauf aufmerksam gemacht, dass dieser Schluss nicht gerechtfertigt ist, weil die drei construirten Paare von Strahlenbündeln nicht voneinander unabhängig sind. In der That lässt sich die Erscheinung von der Theorie vollständig wiedergeben. Dieselbe verläuft, wie die folgende Rechnung zeigen wird, gerade so, als ob jede Reflexion an der geometrischen Grenze zweier aneinander stossender Medien stattfände mit einer Phasenänderung des Strahles von Null, bezüglich einer halben Wellenlänge, je nachdem das zweite Medium optisch dünner oder dichter ist, als das erste.

Die Verrückung der Aethertheilchen sei für den auffallenden Strahl $A \sin(t/\tau - z/\lambda_0)$, worin z die Coordinate senkrecht zur Richtung des Blättchens und mit dem Anfangspunkte in der Ebene desselben und λ_0 die Wellenlänge in Luft bedeuten möge. Es seien im Folgenden x, y Aetherverrückungen; A, a Amplituden. Die Indices 1, 2, 3 mögen sich bei diesen Grössen auf die drei Grenzen der beiden Blättchen beziehen (s. Fig. 10).

Bei den Grössen d und λ indes sollen sich die Indices 1 und 2 auf Glimmer, bezüglich Jodsilber beziehen.

Der im ganzen von den Blättchen reflectirte Strahl kann zunächst als zusammengesetzt betrachtet werden aus zwei Strahlen, von denen der eine an der Fläche 1 reflectirt ist und der zweite selbst wieder aus zwei Einzelreflexionen 2 und 3 besteht. Für $z = 0$ und den ersten dieser Strahlen ist:

$$Y_1 = A_1 \sin\left(\frac{t}{\tau} - \tfrac{1}{2}\right) 2\pi,$$

für den zweiten:

$$Y_2 = A_2 \sin\left(\frac{t}{\tau} - \frac{2d_1}{\lambda_1} - \frac{\delta}{2\pi}\right) 2\pi.$$

Die Intensität des im ganzen reflectirten Strahles ist dann:

$$A^2 = A_1{}^2 + A_2{}^2 - 2A_1 A_2 \cos\left(\frac{2d_1}{\lambda_1} + \frac{\delta}{2\pi}\right) 2\pi.$$

A^2 wird ein Minimum, wenn $(2d_1/\lambda_1) + (\delta/2\pi) = n$, d. h. gleich einer ganzen Zahl wird. Die λ_1, welche dieser Gleichung genügen, entsprechen den Glimmerinterferenzen. Fände die Reflexion an der hinteren Glimmerfläche, anstatt an Jodsilber, an Luft statt, so wäre $\delta = 0$. δ ist also die durch das Jodsilber bedingte Phasenänderung und numerisch gleich der dadurch verursachten Verschiebung der Interferenzstreifen. δ ergibt sich aus der Gleichung $Y_2 = y_2 + y_3$, worin y_2 und y_3 den Einzelreflexionen 2 und 3 entsprechen, es ist:

$$y_2 = a_2 \sin\left(\frac{t}{\tau} - \frac{2d_1}{\lambda_1} - \tfrac{1}{2}\right) 2\pi,$$

$$y_3 = a_3 \sin\left(\frac{t}{\tau} - \frac{2d_1}{\lambda_1} - \frac{2d_2}{\lambda_2}\right) 2\pi.$$

Hieraus findet man:

(1) $$\operatorname{tg}\delta = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi - k},$$ worin:

(2) $$\varphi = \frac{4\pi d_2}{\lambda_2}; \qquad k = \frac{a_2}{a_3}.$$

Ausser der Lage kommt noch die Deutlichkeit der Interferenzstreifen in Frage; diese wird bestimmt durch das Verhältniss $(A_2 : A_1)$ der zur Interferenz gelangenden Strahlen. A_1 ist eine Constante; nur A_2 ändert sich mit der Dicke des Jodsilberblättchens, und zwar ist:

(3) $$A_2^2 = a_2^2 + a_3^2 - 2 a_2 a_3 \cos \varphi.$$

Die Abhängigkeit der Phasenänderung von der Dicke des Jodsilberblättchens wird wesentlich bestimmt durch den Parameter k. Derselbe ist für geringe Dicken klein, weil der Unterschied der Brechungsexponenten von Luft und Jodsilber grösser ist als der von Glimmer und Jodsilber, und die Absorption in dem letzteren noch verschwindend. Bei wachsender Dicke wird aber die Absorption im Jodsilber beträchtlich; es nimmt dann a_3 ab und k zu. So lange k klein ist, kann man mit einer geringen Correction setzen: $\delta = \varphi$. D. h. anfangs nimmt die Phasenänderung mit d_2 fast proportional zu. Die Interferenzen verschieben sich so, als ob die Dicke des Glimmerblättchens um eine im Verhältniss der Wellenlängen stehende Dicke des Jodsilberblättchens zunähme. Bei wachsender Dicke nimmt k zu, und die Abweichung von diesem Verhalten wird grösser. Fragt man, wann die Aenderung von δ mit d_2 am grössten ist, so lehren die Formeln (1) und (2), dass dies dann geschieht, wenn $2 d_2 = m \lambda_2$ ist. Die diese Gleichung befriedigenden λ_2 machen aber gleichzeitig A_2^2 nach Formel (3) zu einem Minimum und entsprechen den für Jodsilber allein auftretenden Interferenzen. D. h. die Glimmerinterferenzen ändern ihre Lage bei gleichbleibender Dickenänderung des Jodsilberblättchens am raschesten an den Stellen, wo sie von den Jodsilberinterferenzen durchsetzt werden; eine Folgerung, welche mit der Beobachtung (s. Fig. 9) im Einklange steht.

Ist k nahezu $= 1$, so dass man setzen kann: $k = \cos \varepsilon$, worin ε einen kleinen Winkel vorstellt, so ergeben sich für φ und δ die folgenden zugehörigen Werthe:

φ	:	ε	π	$2\pi - \varepsilon$	2π
δ	:	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π

Während sich also φ um 2ε ändert in der Nähe von $\varphi = 0$, ändert sich δ um π. Gleichzeitig wird aber A_2 nahezu gleich Null. Daraus folgt, dass die Interferenzen für $\varphi = 2 m \pi$ oder $2 d_2 = m \lambda$ nicht mehr zu erkennen sein werden. Erst wenn φ und mit ihm δ wieder grösser geworden, nimmt auch A_2 wieder zu; d. h. dann tauchen die Interferenzen wieder

auf, verschieben sich nach dem Rothen (da δ mit φ und d_2 wächst), um nachher wieder zu verschwinden. Für $k = 1$ und $\varphi = 0$ macht δ einen Sprung, indem es sich plötzlich um π ändert. Ist k ein wenig grösser als 1, so dass man setzen kann: $k = (1/\cos\varepsilon)$, worin ε wieder einen kleinen Winkel vorstellt, so erhält man für φ und δ die folgenden zugehörigen Werthe:

φ :	ε	π	$2\pi - \varepsilon$	2π
δ :	$\frac{\pi}{2} + \varepsilon$	π	$\frac{3\pi}{2} - \varepsilon$	π.

In diesem Falle pendelt also bereits δ um den Werth π hin und her, wie die Interferenzen um die Mittellage zwischen zwei Interferenzstreifen Glimmer-Luft. Man sieht indess nur die Verschiebung nach Roth und nicht die in der umgekehrten Richtung, weil, für $\varphi = 2m\pi$, A_2 ein Minimum wird, die Interferenzen daher undeutlich werden. Wie man leicht aus Formel (1) erkennt, werden die Grenzen, innerhalb deren δ bei wachsendem k schwankt, immer engere, bis, für $k = \infty$, δ den constanten Werth π annimmt. D. h. bei grösserer Dicke des Jodsilberblättchens bleiben schliesslich die Interferenzstreifen Glimmer-Jodsilber in mitten je zweier Streifen Glimmer-Luft stehen, wie das auch beobachtet wurde. Die Theorie stimmt somit zunächst qualitativ vollständig mit dem Experiment überein. Im Folgenden werden auch Messungen mitgetheilt, welche diese Uebereinstimmung darthun.

Die am Anfang des vorigen Paragraphen aufgeworfene Frage kann jetzt beantwortet werden. Es hat sich herausgestellt, dass schon von den dünnsten Jodsilberschichten an die Erscheinung so verläuft, als ob bei der Reflexion in Glimmer an Jodsilber eine Phasenänderung von einer halben Wellenlänge eintritt. Dieselbe rührt somit weder von einer Verlängerung noch einer Verkürzung des vom Lichte zurückgelegten Weges her und kann demnach nur als die Folge einer Umkehr der Schwingungsrichtung in der reflectirenden Fläche aufgefasst werden.

§. 11. Verwerthung der beschriebenen Interferenzerscheinungen zu einer Methode der Dickenbestimmung, welche eine Silberschicht von der Dicke eines Milliontelmillimeters der Messung noch eben zugänglich macht.

Im vorigen Paragraphen wurde gezeigt, dass die Verschiebung der Interferenzstreifen bei Glimmerblättchen, wenn die zweite Reflexion an sehr dünnen Jodsilberschichten stattfindet, deren Dicke nahezu proportional ist. Diese Thatsache kann dazu benutzt werden, die Dicke von Silberblättchen zu bestimmen von einer Feinheit, bei der andere Methoden versagen. Denn die Verschiebung der Interferenzstreifen ist noch messbar bei keilförmigen Schichten, welche kaum mehr einen Unterschied der Färbung an verschiedenen Stellen aufweisen, deren Dicke somit durch die Färbung kaum mehr zu ermitteln sein dürfte. Um eine Vorstellung zu bekommen, wie weit diese neue Methode reicht, überlege man, dass eine Verschiebung der Interferenzen um eine Streifenbreite der Dicke eines Jodsilberblättchens von einer halben Wellenlänge in Jodsilber oder etwa ein viertel Wellenlänge in Luft entspricht, einer Dicke der ursprünglichen Silberschicht also von etwa $^1/_{16}$ Wellenlänge. Unter günstigen Verhältnissen wird man nun eine Verschiebung von $^1/_{30}$ Streifenbreite noch eben wahrnehmen können. Einer solchen Verschiebung entspricht eine Silberdicke von $1/16 \,.\, 30 = 1/480$ Wellenlänge in Luft. Fand diese Verschiebung für eine Farbe statt, deren Wellenlänge $= 480\,\mu\mu$, so erhellt, dass eine Silberschicht von der Dicke eines Milliontelmillimeters noch eben der Messung zugänglich ist.

Mit Beibehaltung früherer Bezeichnungen ist:

$$2 d_1 n_1 = m\lambda_m = (m+1)\,\lambda_{m+1},$$

$$2 d_1 n_1 + \frac{\delta}{2\pi}\lambda'_{m+1} = (m+1)\,\lambda'_{m+1}, \qquad \text{also:}$$

$$(1) \qquad \frac{\delta}{2\pi}\lambda'_{m+1} = \frac{\lambda'_{m+1} - \lambda_{m+1}}{\lambda^m - \lambda_{m+1}}\lambda_m.$$

Es ist aber (s. p. 35):

$$(2) \qquad \operatorname{tg}\delta = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi - k}, \qquad \text{worin:}$$

$$(3) \qquad \varphi = \frac{4\pi d_2 n_2}{\lambda'_{m+1}}; \qquad k = \frac{a_2}{a_3}.$$

Die Grösse δ berechnet sich nach Formel (1); mit Hülfe von k kann daraus φ und somit d_2 bestimmt werden. Ausser den Brechungsexponenten für Glimmer und Jodsilber ist zur Ermittelung von k noch der Absorptionscoëfficient des Lichtes erforderlich. Derselbe wurde für eine Jodsilberlamelle bestimmt. Wegen der stärkeren Absorption der blauen Strahlen wurden diese bei der Dickenbestimmung meist ausgeschlossen. Für rothe Strahlen und eine Jodsilberdicke von 100 $\mu\mu$ hat k etwa den Werth 0,4. Bis zu dieser Dicke beträgt die Differenz von φ und δ im Maximum $^1/_3\,\varphi$.

Die Bestimmung der Dicke d_2 des Jodsilberblättchens geschah nun in folgender Weise. Es wurde für bestimmte Farben und für verschiedene Werthe d_2 nach den obigen Formeln δ ausgerechnet und als Function von d_2 graphisch dargestellt. Aus den beobachteten δ konnte dann d_2 an den Curven unmittelbar abgelesen werden. Um einen Einblick in die Genauigkeit der Methode zu geben, sind in Tabelle 8 die an verschiedenen Stellen einer keilförmigen Jodsilberschicht ausgeführten Dickenbestimmung zusammengestellt. Uebereinanderstehende Zahlen geben für dieselbe Stelle Werthe, welche aus Verschiebungen der Interferenzen in Nähe der Linien C und E ermittelt sind.

Tabelle 8.

C	11,9	11,8	22,5	36,8	33,3	50,2	73,3	75,8
E	8,6	12,6	22,5	36,5	40,4	50,9	67,0	68,9

Die Abweichungen zweier zugehörigen Werthe bleiben mit Ausnahme derjenigen für die dünnste Stelle unter 20 Proc. Für eine Schicht von grösserer Dicke kann die Methode durch die von Wernicke controlirt werden. Ich erhielt nach der neuen Methode für die Dicke einer Jodsilberschicht die Werthe:

C 125, F 110

nach Wernicke: 113.

§ 12. Wie gering darf die Dicke einer Silberschicht sein, die man noch eben wahrnehmen kann?

Die soeben angegebene Methode macht es möglich, eine Antwort auf diese Frage zu finden. Es wurden unter denselben Verhältnissen zwei Silberspiegel, ein ziemlich dicker und

ein sehr dünner, auf Glimmerblättchen mit gerader Begrenzungslinie (vgl. p. 23) hergestellt. Bei der Herstellung des letzteren war der Inductionsapparat nur wenige Secunden in Thätigkeit. In der Mitte des Spiegels, d. h. unter dem Fusspunkt der Kathode war dann ein deutlicher Silberbeschlag zu erkennen; nach aussen zu aber wurde die Grenze der Belegung auf dem Glimmerblatt verwaschen.

Der Abstand derjenigen Stelle (a) von der Mitte des Spiegels, wo die Grenze bei günstiger Beleuchtung noch eben zu erkennen war, wurde gemessen. Eine unmittelbare Dickenbestimmung dieser Stelle konnte nicht ausgeführt werden, da hier keine Verschiebung der Interferenzstreifen mehr zu erkennen war. Eine ziemlich genaue Schätzung lässt sich aber erreichen, wenn man annimmt, dass die Dicken der beiden unter gleichen Verhältnissen hergestellten Spiegel in gleichen Abständen vom Fusspunkt der Kathode überall im gleichen Verhältniss stehen. Um die Richtigkeit dieser Annahme zu prüfen, wurde die Dicke der dünneren Silberschicht an zwei Stellen (b, c) gemessen, die der dickeren an den entsprechenden. Ausserdem wurde sie an der der Stelle (a) des dünneren Spiegels entsprechenden ermittelt. Die Punkte a, b, c befanden sich in einem Abstande von dem Fusspunkt der Kathode bezüglich gleich 36,2, 6,8 und 2,2 mm. Die Dicken ergaben sich für die dickere (I) bezüglich dünnere (II) Silberschicht wie folgt:

	a	b	c
I	2,1	47	103
II	x	2,4	6,9

Bei Verwendung der Werthe b und c erhält man für die gesuchte Dicke x die Werthe:

0,11 und 0,14,

nach oben zu abgerundet 0,2. Es ist also eine Silberschicht noch wahrnehmbar, deren Dicke nicht grösser ist als 0,2 Milliontelmillimeter.

Nun findet die kinetische Gastheorie für den Moleculardurchmesser verschiedener Elemente und Verbindungen Werthe, die meist zwischen 0,1 und 1 $\mu\mu$ liegen. Van der Waals

berechnet beispielsweise den Moleculardurchmesser von Wasserstoff zu 0,14 $\mu\mu$. Nimmt man an, dass der Durchmesser eines Silbermolecüls von der gleichen Grössenordnung ist, so würde daraus folgen, dass man eine Silberschicht bereits wahrnehmen kann, wenn nur wenige Molecüle in ihr übereinandergelagert sind. Mit Sicherheit kann man aber sagen, dass 0,2 Milliontelmillimeter eine obere Grenze für den Durchmesser eines Silbermolecüls ist.

Es möge noch erwähnt werden, dass schon Faraday[1]) dünne Goldblättchen hergestellt hat, deren Dicke er auf ein Hundertel Wellenlänge, also etwa 5 Milliontelmillimeter schätzte.

V. Genauere Untersuchung der Phasenänderung des Lichtes bei Reflexion an durchsichtigen Metallschichten.

§ 13. Die Abhängigkeit der Phasenänderung von der Dicke der Schicht und von der Farbe bei Silber.

Da es durch die in § 11 beschriebene Methode ermöglicht war, die Dicke von Silberschichten zu messen, bei denen die Phasenänderung bereits anfängt, variabel zu werden, so schien es von Interesse, die Abhängigkeit der Phasenänderung von der Dicke des genaueren festzustellen. Bei diesen durchsichtigen Silberblättchen verstehe ich unter Phasenänderung diejenige des reflectirten Gesammtstrahles, einerlei woher er stammen mag, ob blos von den Grenzen des Silberblättchens oder auch noch von einer Reflexion aus dem Inneren desselben. Für mehrere conusförmige Silberblättchen auf Glimmer wurde an verschiedenen Stellen und für verschiedene Farben die Phasenänderung ermittelt und jeweils die Entfernung der untersuchten Stelle von dem Ende des Blättchens durch Ablesung am Stativ (vgl. p. 24) bestimmt. Sodann wurde die Verwandlung in Jodsilber und die Dickenbestimmung der betreffenden Stellen ausgeführt genau nach der in § 11 beschriebenen Methode. Die Beobachtungen sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt. Die Phasenänderungen sind in Bruchtheilen einer Wellenlänge angegeben. Die über den verticalen Spalten stehenden λ geben die Farbe an, in deren Nähe die Phasenänderung bestimmt wurde. Die den hori-

1) **Faraday**, Pogg. Ann. **101.** p. 313. 1857.

zontalen Spalten voranstehenden d bezeichnen die Dicken der Silberschichten wie früher in Milliontelmillimetern.

Tabelle 9.

Spiegel Nr. 1.

a.				b.			
d	$\lambda = 647$	534	455	d	$\lambda = 647$	512	439
0,8	0,07	0,11	0,08	2,0	0,30	0,55	0,71
1,3	0,17	0,23	0,58	2,3	0,45	0,58	—
2,0	0,30	0,48	0,66	3,0	0,52	0,65	0,73
2,5	0,41	0,54	0,66	3,5	0,55	0,63	0,71
3,4	0,58	0,63	0,70	8,7	0,61	0,68	0,73
8,0	0,63	0,66	0,69	12,1	0,67	0,68	0,69
12,1	0,67	0,70	0,70				

Tabelle 10.

Spiegel Nr. 2.

d	$\lambda = 646$	534	455
5,5	0,45	0,55	0,64
7,4	0,55	0,60	0,66
9,0	0,58	0,61	0,70
11,7	0,59	0,62	0,66
14,2	0,60	—	—
19,3	0,60	—	—
53,4	0,62	0,65	0,67

Tabelle 11.

Spiegel Nr. 3.

d	$\lambda = 652$	531	449
16,2	0,52	0,57	0,64
33,2	0,54	0,60	0,61
76,3	0,57	0,61	0,62
80,4	0,66	0,62	0,62

Für zwei verschiedene Dicken wurde bei Spiegel Nr. 1 die Phasenänderung für mehrere über das ganze Spectrum gleichmässig vertheilte Farben gemessen:

Tabelle 12.

d	$\lambda = 683$	647	615	585	559	534	512	492	473	455	439	424
a) 2,0	0,27	0,30	0,37	0,41	0,42	0,48	0,53	0,58	0,62	0,66	0,71	0,76
b) 12,1	—	0,67	0,63	0,67	0,63	0,70	0,68	0,66	0,68	0,70	0,69	0,67

Zur Veranschaulichung der Beobachtungen dienen die Curven der Fig. 11. Zur Verzeichnung derselben wurden diejenigen Tabellen benutzt, die eine grössere Anzahl von Punkten ergeben.

So dienten die Werthe der Tabelle 9a zur Construction der drei Curven Fig. 11_a, welche für die drei Farben im Orange ($\lambda = 647$), Grün ($\lambda = 534$) und Blau ($\lambda = 455$) die Ab-

hängigkeit der Phasenänderung von der Dicke der Silberschicht darstellen.[1]) Der Tabelle 10 ist die Curve Fig. 11_b für $\lambda = 646$ entnommen. Beim Anblick dieser Curven springt zweierlei sofort in die Augen. Die Phasenänderung steigt anfangs bis zu einer Dicke von etwa $4\,\mu\mu$ (bei Spiegel No. 1) sehr rasch und wird bald nachher nahezu constant, für Spiegel No. 2 etwa von einer Dicke von $12\,\mu\mu$ an. Die Aenderung der Phasenverzögerung geht bei Dicken kleiner als $4\,\mu\mu$ für Blau am raschesten, für Orange am langsamsten. Dies hat die Interferenzerscheinung zur Folge (Fig. 12), wie sie aus den Angaben der Tabelle 12 für $d = 2\,\mu\mu$ ersichtlich ist. Für eine solche Dicke beträgt die Verschiebung der Silberinterferenzstreifen im Rothen etwa eine viertel Streifenbreite nach Roth und nimmt, wenn man nach dem Violetten geht, immer mehr zu, bis sie dort eine Grösse von etwa drei viertel Streifenbreiten erreicht. Dieses Verhalten spricht sich auch in der Form des Bogens aus, durch welchen die Interferenzen in Fig. 7 zusammenhängen. Das Mittelstück dieses Bogens ist im Rothen ein wenig geneigt, während es im Blauen nahezu horizontal verläuft. Dieses merkwürdige Verhalten ist keine besondere Eigenthümlichkeit der von mir gewöhnlich benutzten Spiegel; denn die nämliche Erscheinung (Fig. 7) wie bei zerstäubtem Silber auf Glimmer zeigte sich auch bei zerstäubtem Silber auf Glas und chemisch niedergeschlagenem Silber auf Glas.

Die verschiedene Grösse der Phasenänderung für die gleiche Dicke bei verschiedenen Spiegeln erklärt sich aus dem verschiedenen Grade der Verunreinigung durch Silberoxyd. Namentlich bei Spiegel No. 3 ist das der Grund, weshalb die Phasenänderung erst bei einer bedeutend grösseren Dicke als bei den anderen Spiegeln beginnt constant zu werden.

§ 14. Welchen Einfluss hat das Medium, an dem die zweite Reflexion im Silber stattfindet?

Bei den bisher erwähnten Versuchen fand die Reflexion an der hinteren Silberfläche stets an Luft statt. Es ist von

1) Dass für $d = 0{,}8$ der Werth der Phasenänderung für $\lambda = 534$ nicht zwischen die beiden anderen Werthe fällt, kann auf einem Fehler beruhen. Bei der Verzeichnung wurde dem übrigen Verlaufe der Curven gemäss der Werth der Phasenänderung für diese Farbe als zwischen den beiden anderen liegend angenommen.

vornherein klar, dass die Phasenänderung im allgemeinen eine andere sein wird, wenn an die Stelle von Luft ein anderes Medium tritt. Man stelle sich z. B. vor, dass sich hinter dem Glimmerblättchen ein Medium von höherem Brechungsexponenten als dem des Glimmers befinde, dann wird bei einer undurchsichtigen Silberschicht die Verschiebung der Silberinterferenzen nur etwa eine viertel Streifenbreite betragen, entsprechend der bei der Reflexion an der unbelegten Stelle nun auftretenden Phasenänderung einer halben Wellenlänge. Für eine Silberdicke gleich Null ist aber keine Verschiebung mehr vorhanden. Es wird also, wenn man von Stellen dickerer zu solchen dünnerer Silberschichten geht, die Verschiebung von etwa eine viertel Streifenbreite bis Null abnehmen. Von der Richtigkeit dieser Ueberlegung kann man sich leicht überzeugen, wenn man das Glimmerblättchen mit dem darauf niedergeschlagenen Silber zur vorderen Verschlussplatte eines Glastroges macht, den man mit flüssigem Phosphor von einem Brechungsexponenten gleich ca. 2 macht.

Um unmittelbar nachzuweisen, dass ein Phasenunterschied bei der Reflexion Silber-Luft und Silber-Phosphor besteht, stellte ich an der Silberbelegung eine Grenze Luft-Phosphor her. Man sah dann im Spectrum eine kleine Verschiebung der Interferenzstreifen für Phosphor gegen die für Luft nach dem Rothen zu.

Es war von Interesse, zu erfahren, wie sich die Erscheinung gestalten würde, wenn die zweite Reflexion im Silber an einem Medium stattfände von ungefähr gleichen Brechungsexponenten wie dem des Glimmers. Als solches wählte ich Cassiaöl. Der Versuch wurde so angestellt, dass man im Gesichtsfelde zwei Grenzen wahrnahm. Die eine entsprach der Reflexion Glimmer-Luft und Glimmer-Silber-Luft; die zweite in geringem Abstande von der ersten den Reflexionen Glimmer-Silber-Luft und Glimmer-Silber-Cassiaöl. In Fig. 13 ist die Erscheinung dargestellt, wie sie für eine Silberdicke auftritt, bei der die Verschiebung der Silberinterferenzen im Rothen etwa ein viertel, im Blauen drei viertel Streifenbreiten beträgt. Es zeigt sich hier das merkwürdige Verhalten, dass die Verschiebungen der Interferenzstreifen an der zweiten Grenze

in verschiedenen Theilen des Spectrums nach verschiedenen Seiten gerichtet ist. Während im Rothen die Cassiainterferenzen nach dem Rothen zu verschoben sind, geht die Verschiebung im Blauen nach dem Violetten zu und ist für Grün gleich Null. Auf die Discussion dieser complicirten Erscheinungen soll nicht eingegangen werden.

§ 15. Verhalten des Goldes.

Ich wollte diese Versuche nicht abschliessen, bevor ich wenigstens für ein anderes Metall den Verlauf der Phasenänderung untersucht hätte. Dazu wurde Gold gewählt. Dies zeigte ein ganz merkwürdiges Verhalten. Wenn man die Dicke des Goldes von Null allmählich zunehmen liess, ging die Verschiebung der Goldinterferenzen wie bei Silber anfangs an allen Theilen des Spectrums nach Roth. Bei zunehmender Dicke trat aber ein verschiedenes Verhalten für verschiedene Farben ein. Während die Streifen im Rothen mit nur geringen Schwankungen nach Roth zu weiter gingen bis zu einer Verschiebung von etwa dreiviertel Streifenbreiten, gingen sie bei F wieder auf Null zurück und dann bis zu einer viertel Streifenbreite nach dem Violetten. Für Grün, welche Farbe bekanntlich vom Gold am besten durchgelassen wird, ist das Verhalten ähnlich wie das für durchsichtige Körper beobachtete. Die Interferenzen werden zeitweilig undeutlich und tauchen dann wieder an einer anderen Stelle auf, als an derjenigen, wo sie verschwanden. Zuletzt ist aber die gegenseitige Stellung der Interferenzstreifen in allen Theilen des Spectrums nahezu dieselbe. Die Goldinterferenzen stehen wie bei dickeren Silberschichten von den Luftinterferenzen, die von ihnen aus nach Violett zu liegen, zwei- bis dreimal weiter ab als von den nach Roth zu gelegenen. Welches nun bei Gold der Sinn der Phasenänderung (ob Beschleunigung oder Verzögerung) ist, und wie diese ganze Frage mit dem Eindringen des Lichtes in die Metalle zusammenhängt, darauf hoffe ich bei einer anderen Gelegenheit zurückzukommen.

Schluss und Zusammenstellung der Resultate.

Experimentell wird es zunächst wichtig sein, nicht allein für das reflectirte, sondern auch für das durchgehende Licht

und nicht allein für Silber, sondern auch für andere Metalle den Gang der Phasenänderung festzustellen und die Beziehung desselben zur Absorption des Lichtes zu untersuchen. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass man dann auch auf die Brechungsexponenten der Metalle wird Rückschlüsse machen können.

Die Hauptergebnisse der vorliegenden Arbeit sind die folgenden:

1) Es wurden drei verschiedene Methoden zur Dickenbestimmung dünner Blättchen gefunden:

a) Die erste ist auf durchsichtige Körper und solche Metalle anwendbar, welche sich unbeschadet der Spiegelung in Verbindungen überführen lassen mit normaler Phasenänderung. Es ist indes weder erforderlich, dass diese Verbindungen gut durchsichtig sind, noch dass man ihren Brechungsexponenten kennt.

b) Die zweite ist auf alle Metalle anwendbar, vorerst aber nur für eine Metallschicht von beträchtlicher Dicke als brauchbar nachgewiesen.

c) Die dritte eignet sich für Silberschichten von einer Dicke von etwa 1—25 Milliontelmillimetern.

2) Im Anschluss an die letzte Methode ergibt sich als eine obere Grenze für den Moleculardurchmesser von Silber, d. h. die Dicke einer noch eben sichtbaren Silberschicht, 0,2 Milliontelmillimeter.

3) Die Aenderung der Phase bei senkrechter Reflexion des Lichtes an Silber nimmt von Null bis zu höchstens etwa dreiviertel Wellenlängen zu, wenn die Dicke des Silbers von Null bis zur Undurchsichtigkeit wächst. Die Phasenänderung entspricht einer Verzögerung und nicht einer Beschleunigung.

4) Die Phasenänderung bei senkrechter Reflexion des Lichtes an durchsichtigen Körpern in optisch dünneren an optisch dichteren ist weder als eine Verzögerung, noch als Beschleunigung anzusehen. Sie wird durch eine Umkehr der Schwingungsrichtung in der reflectirenden Oberfläche erklärt.

5) Es wurde bei Silber für verschiedene Farben die Abhängigkeit der Phasenänderung der Reflexion von der Dicke des Blättchens bestimmt.

Phys. Inst. d. Univ. Strassburg i. E.

Lebenslauf.

Ich, Otto Heinrich Wiener, evangelischer Confession, wurde am 15. Juni 1862 zu Karlsruhe geboren. Nachdem ich den Elementarunterricht in der Vorschule des dortigen Gymnasiums erhalten hatte, trat ich in das Gymnasium selbst ein und wurde daraus im Herbst 1880 mit dem Zeugniss der Reife entlassen. Hierauf besuchte ich zunächst während eines Jahres die technische Hochschule zu Karlsruhe und genügte dann gleichfalls in Karlsruhe meiner Militärdienstpflicht als Einjährig-Freiwilliger. Herbst 1882 bezog ich die Universität Strassburg, um mich dem Studium der Mathematik und Naturwissenschaften zu widmen. Nach Ablauf von drei Semestern ging ich auf ein Jahr an die Universität Berlin und kehrte dann wieder an die Universität Strassburg zurück.

Ich hörte Vorlesungen bei den Herren Professoren und Docenten: Birnbaum, E. Schröder, Sohncke, Valentiner, Waitz, Wedekind, Wiener in Karlsruhe; Christoffel, Cohn, Groth, W. Kohlrausch, Kundt, Reye, O. Schmidt, Stenger, Ziegler in Strassburg; E. du Bois-Reymond, Fuchs, v. Helmholtz, Kayser, Kirchhoff, Paulsen, Schwendener, Treitschke in Berlin.

Allen diesen meinen verehrten Lehrern fühle ich mich zu grossem Danke verpflichtet, insbesondere Hrn. Prof. Dr. Kundt, auf dessen Anregung und unter dessen Leitung die vorliegende Arbeit ausgeführt wurde.

Fig. 3.

Fig. 1. b

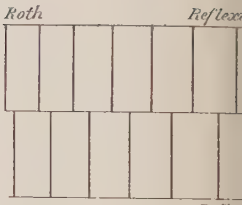
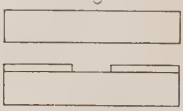


Fig. 1. a



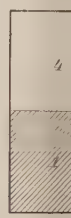
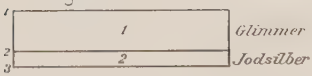


Fig. 10



Schnittlinie

Fig. 2.

Fig. 7.

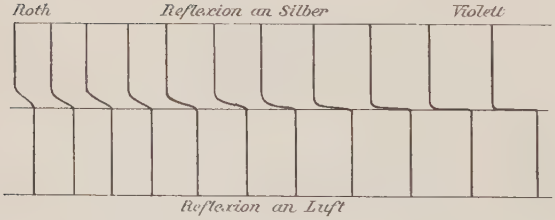


Fig. 9.

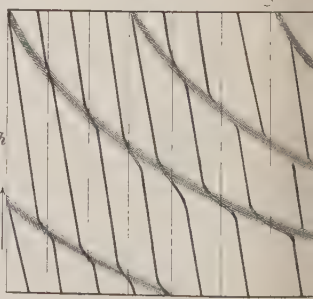


Fig. 5.

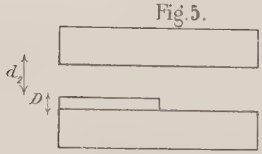


Fig. 13.

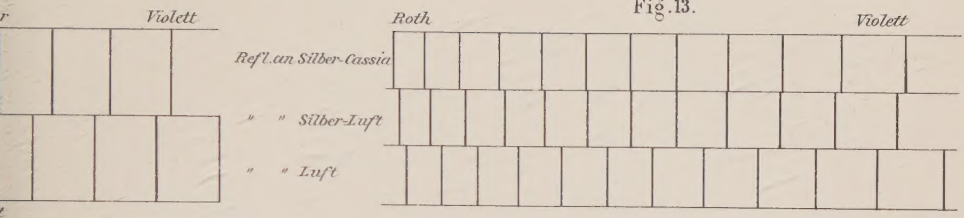


Fig. 4.

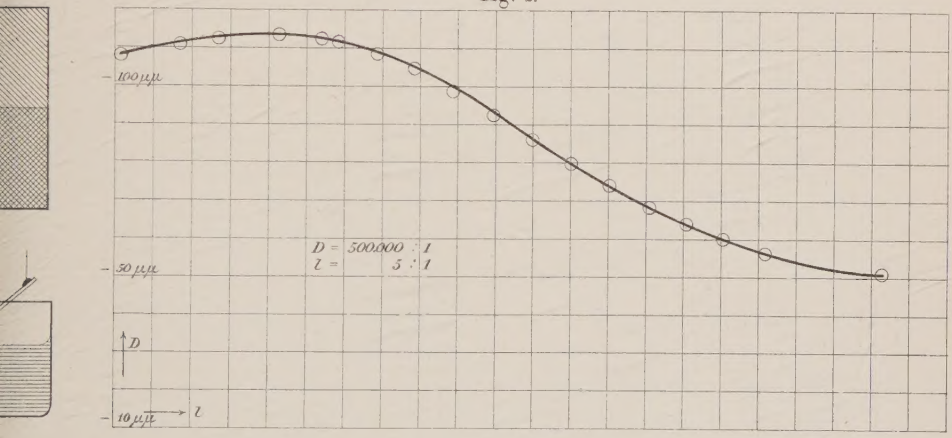
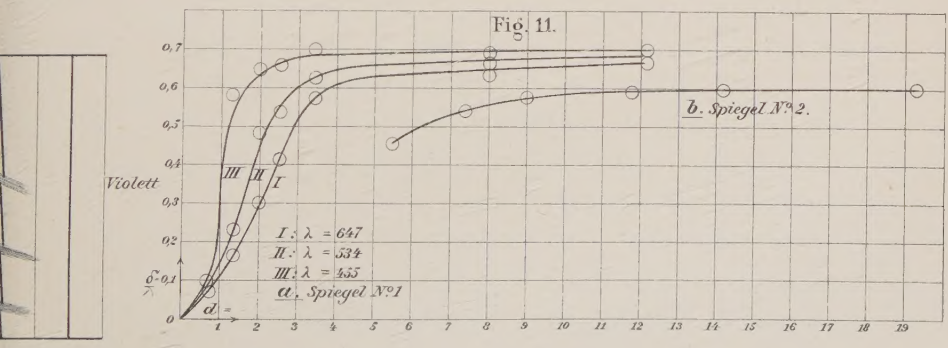



Fig. 11.